

**RANCANG BANGUN CATU DAYA OTOMATIS UNTUK  
*ELECTROFORMING* JENIS TEMBAGA ASAM**

**TESIS**

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
MINAT SISTEM KONTROL DAN ELEKTRONIKA**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Magister Teknik



**ARIE CAHYO UTOMO**  
NIM. 186060300111005

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2021**



# TESIS

## RANCANG BANGUN CATU DAYA OTOMATIS UNTUK *ELECTROFORMING* JENIS TEMBAGA ASAM

**ARIE CAHYO UTOMO**  
**NIM. 186060300111005**

telah dipertahankan di depan penguji  
pada Tanggal **18 Juni 2021**  
dinyatakan telah memenuhi syarat  
untuk memperoleh gelar **Magister Teknik**

### Komisi Pembimbing

Pembimbing I



**Dr. Ir. Ponco Siwindarto, M.Eng.Sc.**

Pembimbing II



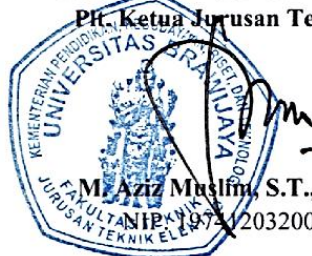
**Dr.-Ing. Onny Setyawati, S.T., M.T., M.Sc.**

Malang, **12 JUL 2021**

Universitas Brawijaya

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro

**Ph. Ketua Jurusan Teknik Elektro**



**M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.**

**NIP. 197412032000121001**

## PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan Saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran Saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, Saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 tahun 2003, Pasal 25 Ayat 2 dan Pasal 70).

Malang, 12 Juli 2021

Mahasiswa,



Nama : **ARIE CAHYO UTOMO**

NIM : **186060300111005**

PM : **TEKNIK ELEKTRO**

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO**

## **Lembar Peruntukan**

Dengan menyebut nama Allah yang maha pengasih lagi maha penyayang, dan segala puji bagi Allah pemilik alam semesta ini. Berkat rahmat Allah, saya dapat menyelesaikan Tesis ini untuk mendapatkan gelar master teknik. Saya sangat menyadari bahwa Tesis ini masih jauh dari kata sempurna. Dengan segala keterbatasan yang saya miliki, maka izinkanlah saya untuk mempersembahkan hasil penelitian ini untuk orang-orang yang selama ini memberi dukungan, motivasi serta berjuang bersama dalam proses pengerjaan laporan penelitian tugas akhir ini.

1. Untuk kedua orang tua saya tercinta dan keluarga besar di Berau-Kalimantan Timur dan di Jawa Timur yang telah memberikan doa serta dukungan untuk kelancaran penyelesaian Tesis ini.
2. Seluruh pengrajin perhiasan di Kota Malang yang telah membantu dalam memberikan data-data untuk menunjang penilitan ini.
3. Faishal Arifin dan Ratna sebagai pemilik CV. Silver 999 yang telah memberikan fasilitas untuk melakukan penelitian.
4. Zacky, Anggoro, Dio dan seluruh teman-teman angkatan 2018 di Pascasarjana Teknik Elektro yang telah menemani selama masa perkuliahan, serta turut memberikan doa dan dukungan dalam menyelesaikan Tesis ini.

Demikian saya sampaikan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu. Semoga Tesis ini bisa menjadi salah satu faktor dalam perkembangan UMKM di Indonesia, khususnya Kota Malang. Amin.

## LEMBAR RIWAYAT HIDUP



**Arie Cahyo Utomo, S.T**

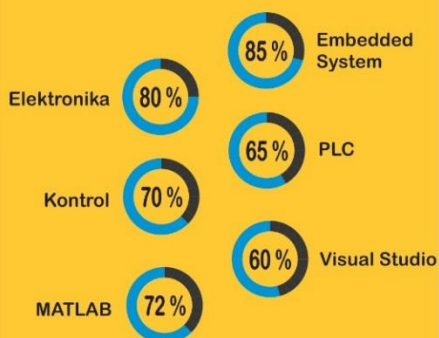
### Kontak

✉ ariecahyo.9294@gmail.com

☎ 08155511546

🏠 Balikpapan, Kalimantan Timur

### Kemampuan



### Profil

Tempat Tanggal Lahir : Tarakan, 9 Februari 1994

Alamat di Malang : Jl. Margojoyo, Gg. 2. Kecamatan Dau

Jenis kelamin : Laki-laki

Agama : Islam

Kewarganegaraan : Indonesia

Status : Belum Menikah



### Pendidikan

2000 - 2006 : SD Negeri 1 Tanjung redeb

2006 - 2009 : SMP Negeri 9 Berau

2009 - 2012 : SMA Negeri 4 Berau

2012 - 2017 : Teknik Elektro Universitas Muhammdiyah Malang



### Organisasi

2012 - 2013 : Anggota divisi keilmuan organisasi EAMY UMM

2013 - 2014 : Kepala divisi keilmuan organisasi EAMY UMM

2014 - 2015 : Sekretaris umum organisasi EAMY UMM  
Asisten laboratorium fisika UMM  
Anggota divisi Litbang organisasi ScienceThink UMM

2015 - 2016 : Ketua umum organisasi ScienceThink UMM



### Pengalaman

2015 : Peserta KOMURINDO

2016 : 1. Peserta KOMURINDO  
2. Praktek kerja lapang di PUSTEKBANG LAPAN posisi tim peneliti bidang propulsi untuk mesin UAV LSU 03, selama 2 bulan

2017 : 1. Tim teknisi dalam pembuatan mesin uji fatigue - Teknik Mesin UMM  
2. Tim desainer dalam pembuatan otomasi pengisian tanah kompos di Pujon

Sekarang : Tim desainer dalam pembuatan alat penyepuhan - emas, kerja sama dengan UKM silver 999

## **Lembar Ucapan Terima Kasih**

Saya mengucapkan banyak terima kasih kepada yang terhormat yang telah membantu hingga Tesis ini jadi, diantaranya:

- Dr. Ir. Ponco Siwindarto, M.Eng.Sc (Dosen Pembimbing Tesis)
- Dr. Ing.Onny Setyawati, ST., MT (Dosen Pembimbing Tesis)
- Dr. Eng. Panca Mudjirahardjo, ST., MT. (Ketua Program Magister Teknik Elektro)
- Zainul Abidin, ST., MT., M.Eng., Ph.D (Penguji Tesis)
- Dr. Ir. Erni Yudaningtyas, MT. (Penguji Tesis)
- Budiono, SSi., MT (Kepala Laboratorium Fisika Universitas Muhammadiyah Malang)
- Faishal Arifin, SE (Direktur CV. Silver 999)





## RINGKASAN

**Arie Cahyo Utomo**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2021, *Rancang Bangun Catu Daya Otomatis untuk Electroforming Jenis Tembaga Asam*, Dosen Pembimbing: Ponco Siwindarto dan Onny Setyawati.

Pembuatan perhiasan memiliki berbagai macam proses, salah satunya adalah *electroforming*. Hasil dari proses tersebut dikenal dengan *Electroforming Jewelry* dan *Electroforming jewelry* ini merupakan salah satu produk industri kreatif favorit di Kota Malang. Namun pengrajin masih memiliki beberapa kendala dalam produksinya, diantaranya adalah hasil yang memiliki warna terbakar dan hasil pelapisan yang tidak merata pada produk mereka. Hal tersebut disebabkan oleh perubahan arus listrik yang semakin besar, dan perubahan ini terjadi akibat nilai resistansi dari objek yang dilapisi berubah. Melihat fenomena tersebut, maka solusi yang terbaik adalah membuat catu daya otomatis yang harus mampu mengontrol arus listrik yang konstan walaupun nilai resistansinya berubah-ubah selama proses.

Di Tesis ini, karakteristik *electroforming* dimodelkan menggunakan regresi polinomial sebagai *plant*. Aktuator yang digunakan adalah *buck converter* dan dimodelkan menggunakan *state space*. Hasil kedua pemodelan matematis ini disimulasikan ke dalam Scilab bersamaan dengan empat kontroler yang akan dipilih sebagai kontroler terbaik. Empat kontroler itu adalah kontrol konvensional, kontrol P, PI dan PID. Setelah ditemukan kontroler yang terbaik, sistem secara keseluruhan disimulasikan ke dalam Xcos Scilab untuk mengetahui keberhasilan sistem yang telah dirancang.

Hasil simulasi Scilab menunjukkan bahwa kontrol PI adalah kontrol terbaik untuk mengontrol arus, dan hal ini sudah terbukti di dalam simulasi Xcos Scilab. Konstanta  $K_p$  149,0542, dan nilai  $K_i$  4968,5 diimplementasikan ke dalam Atmega16 (prosesor untuk perangkat keras sistem). Dengan kontrol integralnya menggunakan metode numerik trapezoidal dan diletakkan dalam fasilitas *Interrupt Timer 0* Atmega16.

Hasil implementasinya adalah perangkat keras atau catu daya sudah bekerja otomatis untuk mengontrol arus agar selalu konstan. Rerata galat pada kontrol tegangan konstan sebesar 2,09% dan rerata galat pada kontrol arus konstan sebesar 9,25%. Dampak dari galat tersebut ternyata berpengaruh pada hasil pelapisannya juga, baik pelapisan yang dilakukan secara satuan (tunggal) ataupun pelapisan paralel (masal). Hasil ketebalan pelapisan berbeda dari perhitungannya, namun tidak menyebabkan warna yang terbakar maupun hasil tidak merata.

Kata Kunci: *electroforming*, kontrol, catu daya, *buck converter*, regresi polinomial

## SUMMARY

**Arie Cahyo Utomo**, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, July 2021, Design and Build Automatic Power Supply for Electroforming of Acid Copper, Academic Supervisor: Ponco Siwindarto dan Onny Setyawati.*

*The production of jewelry has several kind of process, one of them is electroforming. The result of this process is known as Electroforming Jewelry and it is the favorite product of creative industry in Malang city. However the craftsman has some problems in their production process. Those problems are the burnt color and uneven results in their Electroforming Jewelry. Those problems have been caused by a change of electric current and have been affected by a change of work unit resistance while the process. The solution for these problems is by creating automatic power supply which it can control electric current to be constant even if there is resistance change while in the process of production.*

*In this thesis, electroforming characteristic was built by the polynomial regression as a plant. The actuator used was buck converter and were built by state space. The results of those models were simulated by Scilab software which would be combined with one of the best four controllers. Those four of controller were Conventional Controller, P Controller, PI and PID Controller. After we knew which one was the best controller, all system would be simulated again in Xcos Scilab software to understand the best performance of system.*

*The results of the simulation were, PI control as the best controller to control electric current and it was already proved by Xcos Scilab simulation. The number of  $K_p$  and  $K_i$  were 149,0542 and 4968,5, respectively. Those numbers were implemented to Atmega16 (the processor of hardware system) and its integral control used the numeric method of trapezoidal and it was put in Interrupt Timer 0 facility at Atmega16.*

*The result of implementation was the hardware system or the power supply worked well to automatically control the constant electric current.. The average error from the Constant Voltage Mode was 2,09% and the average error of the Constant Current Mode was 9,25%. The effect of that error was actually affecting the coating results, whether in single coating or in parallel (mass) coating. The thickness coating results had different numbers from the calculation, yet it did not affect the burnt color and the uneven results.*

*Keywords: electroforming, control, power supply, buck converter, polynomial regression*

## KATA PENGANTAR

Untuk memajukan Indonesia, tidak bisa dilakukan oleh 1 orang. Melainkan seluruh lini masyarakat harus bersatu dan bergotong royong. Salah satunya antara ilmuwan, akademisi dan pelaku ekonomi harus saling melengkapi. Semuanya harus saling memberikan andil, baik inovasi, saran-saran atau data-data yang menunjang perkembangan teknologi bagi Indonesia.

Maka dengan semangat tersebut kami membuat penelitian dan dituangkan dalam Laporan Tesis ini. Penelitian ini adalah hasil kolaborasi antara pelaku kerajinan perhiasan Malang, akademisi dan ilmuwan. Penelitian ini berfokus menemukan solusi bagi pengrajin perhiasan *electroforming* untuk menghasilkan produk yang unggul, maka keluaran dari penelitian ini adalah catu daya otomatis yang dapat mengontrol pelapisan *electroforming*.

Dalam penulisan Laporan Tesis ini, penulis menyadari bahwa ini jauh dari kata sempurna. Untuk itu saran dan kritik yang membangun ke arah penyempurnaan buku ini penulis terima dengan tangan terbuka. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan penghargaan kepada semua pihak yang telah terlibat dalam penyusunan laporan ini. Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas semua kebaikan dan jerih payah saudara-saudara sekalian.

Malang, Juli 2021  
Penulis

Arie Cahyo Utomo

## DAFTAR ISI

<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1. Penelitian Terkait.....	5
2.2. Kajian Teori .....	6
2.2.1 Electroforming .....	6
2.2.2 Catu Daya.....	10
2.2.3 Regulator.....	13
2.2.4 Kontrol PID.....	19
2.2.5 Regresi Polinomial.....	22
<b>BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN</b> .....	25
3.1. Deskripsi Permasalahan.....	25
3.2. Kerangka Penelitian.....	26
3.2.1. Pengumpulan Data .....	28
3.2.2. Perancangan Alat .....	28
3.3. Alur Langkah Penelitian.....	28
3.4. Hipotesis .....	30
<b>BAB IV METODE PENELITIAN</b> .....	31

4.1.	Karakteristik Plant .....	32
4.2.	Pemodelan Matematis dan Simulasi .....	32
4.2.1.	Pemodelan matematis plant.....	32
4.2.2.	Pemodelan matematis aktuator.....	34
4.2.3.	Pemodelan matematis kontroler .....	35
4.2.4.	Simulasi .....	38
4.3.	Implementasi perangkat keras .....	39
4.3.1.	Sensor Arus .....	39
4.3.2.	Sensor tegangan.....	40
4.3.3.	Aktuator.....	41
4.3.4.	Program mikrokontroler .....	42
4.4.	Pengujian Sistem Perangkat.....	43
<b>BAB V</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>45</b>
5.1.	Karakteristik dan pemodelan matematis plant.....	45
5.2.	Karakteristik dan pemodelan matematis aktuator.....	48
5.3.	Analisis hasil simulasi .....	50
5.3.1.	Kontrol konvensional .....	50
5.3.2.	Kontrol P .....	51
5.3.3.	Kontrol PI.....	52
5.3.4.	Kontrol PID .....	54
5.3.5.	Simulasi Scilab Xcos.....	56
5.4.	Analisis hasil implementasi perangkat keras .....	57
5.4.1.	Sensor Arus .....	57
5.4.2.	Sensor Tegangan .....	67
5.4.3.	Program mikrokontroler .....	68
5.4.4.	Analisis pengujian sistem pada pelapisan .....	70
<b>BAB VI</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>75</b>

6.1. Kesimpulan.....	75
6.2. Saran .....	76
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>77</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>79</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kapasitas kemampuan larutan kimia pada <i>electroforming an acid copper</i> .....	9
Tabel 2. 2 Hasil perhitungan kecepatan deposisi pada tembaga .....	10
Tabel 2. 3 Perbandingan 3 teknologi regulator .....	14
Tabel 5. 1 Hasil pencarian nilai Kp kontrol P .....	52
Tabel 5. 2 Hasil pencarian nilai Kp dan Ki .....	54
Tabel 5. 3 Hasil pencarian nilai Kp Ki dan Kd .....	55
Tabel 5. 4 Hasil pengujian ACS758 menggunakan ADC 10 bit .....	59
Tabel 5. 5 Analisis perhitungan kalibrasi ACS758 10 bit .....	59
Tabel 5. 6 Hasil pengujian ACS758 ADC 10 bit setelah kalibrasi .....	61
Tabel 5. 7 Hasil pengujian ACS758 menggunakan ADC 16 bit .....	61
Tabel 5. 8 Analisis perhitungan kalibrasi ACS758 ADC 16 bit.....	62
Tabel 5. 9 Hasil pengujian ACS758 ADC 16 bit setelah kalibrasi .....	63
Tabel 5. 10 Hasil pengujian sensor INA219 .....	64
Tabel 5. 11 Analisis perhitungan regresi linier pada INA219 .....	65
Tabel 5. 12 Hasil pengujian INA219 setelah kalibrasi .....	66
Tabel 5. 13 Sintaks program untuk kontrol mode konstan tegangan .....	68
Tabel 5. 14 Data hasil uji coba mode konstan tegangan .....	69
Tabel 5. 15 Sintaks program untuk kontrol arus konstan .....	69
Tabel 5. 16 Data hasil uji coba mode konstan arus .....	70
Tabel 5. 17 Hasil pelapisan tunggal uji coba perangkat .....	73
Tabel 5. 18 Hasil pelapisan paralel spesimen uji coba perangkat .....	74

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Susunan kimi tembaga sulfat.....	7
Gambar 2. 2 Arah penguraian ion-ion logam.....	8
Gambar 2. 3 Penempatan katoda dalam pelapisan logam (Leslie Curtis, 2004, p. 48).....	9
Gambar 2. 4 Blok diagram penyearah pensakelaran ( <i>switch-mode</i> ).....	11
Gambar 2. 5 IC pembangkit pulsa atau denyut dalam SMPS .....	12
Gambar 2. 6 (a) Dasar <i>DC-DC converter</i> (b) Rangkaian setara <i>DC-DC Converter</i> (c) Sinyal tegangan keluaran.....	14
Gambar 2. 7 (a) Rangkaian <i>Buck Converter</i> (b) Rangkaian setara saklar tertutup (c) Rangkaian setara saklar terbuka .....	15
Gambar 2. 8 Bentuk gelombang <i>Buck Converter</i> : (a) arus induktor (b) arus induktor (c) arus kapasitor .....	16
Gambar 2. 9 Bentuk gelombang tegangan keluaran <i>ripple</i> : (a) Arus kapasitor (b) Tegangan <i>ripple</i> kapasitor.....	19
Gambar 2. 10 Sistem PID dengan loop tertutup.....	19
Gambar 2. 11 Blok diagram dengan kompensasi: (a) Kompensasi seri (b) Kompensasi parallel atau <i>feedback</i> .....	20
Gambar 2. 12 Kurva root-locus: (a) <i>Single pole system</i> (b) <i>Two pole system</i> (c) <i>three-pole system</i> .....	22
Gambar 2. 13 (a) Kurva <i>root locus</i> sistem 3 <i>pole</i> (b), (c) dan (d) kurva <i>root locus</i> dengan penambahan <i>zero</i> pada sistem .....	22
Gambar 3. 1 Hasil pelapisan warna yang terbakar.....	25
Gambar 3. 2 Hasil pelapisan tidak merata.....	25
Gambar 3. 3 Hasil pengujian pelapisan electroforming tidak terkontrol .....	26
Gambar 3. 4 Kerangka penelitian.....	27
Gambar 3. 5 Diagram blok perancangan alat .....	28
Gambar 3. 6 Diagram alir langkah-langkah penelitian .....	29
Gambar 4. 1 <i>Flowchart</i> pengumpulan data .....	31
Gambar 4. 2 Benda kerja untuk penentuan karakteristik <i>plant</i> .....	32
Gambar 4. 3 Dimensi bejana untuk cairan kimia .....	33
Gambar 4. 4 Diagram alir program regresi polinomial bagian 1 .....	33
Gambar 4. 5 Diagram alir program regresi polinomial bagian 2 .....	34
Gambar 4. 6 Diagram blok untuk mencari nilai <i>Kp</i> menggunakan <i>root locus</i> .....	37



Gambar 4. 7 Arus referensi untuk pengujian sistem simulasi .....	38
Gambar 4. 8 Blok <i>State Space</i> Xcos Scilab simulasi sistem .....	39
Gambar 4. 9 Rangkaian pengujian sensor arus .....	40
Gambar 4. 10 Rangkaian pengujian sensor tegangan.....	41
Gambar 4. 11 Rangkaian aktuator dan sensor .....	42
Gambar 4. 12 Jenis spesimen untuk uji coba.....	43
Gambar 5. 1 Hasil uji coba karakteristik plant .....	45
Gambar 5. 2 Respon arus pada <i>plant</i> .....	46
Gambar 5. 3 Hasil pendekatan polinomial orde 10 .....	47
Gambar 5. 4 Diagram blok <i>state space plant</i> pada Xcos Scilab.....	48
Gambar 5. 5 Karakteristik tegangan keluaran aktuator .....	49
Gambar 5. 6 Karakteristik arus keluaran aktuator .....	49
Gambar 5. 7 Respon arus kontrol konvensional.....	50
Gambar 5. 8 Diagram blok kontrol konvensional .....	51
Gambar 5. 9 Perbandingan nilai Kp berbeda dalam simulasi dalam kontrol P .....	52
Gambar 5. 10 Diagram blok kontrol P .....	52
Gambar 5. 11 Perbandingan nilai Kp berbeda dalam simulasi Kontrol PI .....	53
Gambar 5. 12 Diagram blok kontrol PI.....	54
Gambar 5. 13 Diagram blok kontrol PID .....	54
Gambar 5. 14 Perbandingan nilai Kp berbeda dalam simulasi Kontrol PID.....	55
Gambar 5. 15 Hasil arus keluaran simulasi Xcos Scilab .....	56
Gambar 5. 16 Hasil respon tegangan keluaran simulasi Xcos Scilab .....	57
Gambar 5. 17 Instalasi pengujian sensor arus .....	58
Gambar 5. 18 Grafik arus keluaran ACS758 menggunakan ADC 10 bit .....	58
Gambar 5. 19 Grafik analisis regresi linier pada kalibrasi ACS758 .....	60
Gambar 5. 20 Hasil pengujian ACS758 ADC 10 bit setelah kalibrasi.....	60
Gambar 5. 21 Grafik arus keluaran ACS758 menggunakan ADC16 bit .....	62
Gambar 5. 22 Grafik analisis regresi linier ACS758 ADC 16 bit .....	63
Gambar 5. 23 Hasil pengujian ACS758 ADC 16 bit setelah kalibrasi.....	64
Gambar 5. 24 Respon arus sensor INA219 .....	65
Gambar 5. 25 Grafik analisis regresi linier INA219 .....	66
Gambar 5. 26 Respon arus sensor INA219 setelah kalibrasi .....	67
Gambar 5. 27 Hasil uji coba mode BUS INA219 .....	67
Gambar 5. 28 Hasil uji coba mode SHUNT INA219.....	68

Gambar 5. 29 Rangkaian papan sirkuit sistem catu daya otomatis .....	71
Gambar 5. 30 Bentuk catu daya otomatis .....	71
Gambar 5. 31 Hasil ujicoba perangkat pada 2 jenis spesimen .....	72

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Program Regresi Polinomial .....	79
Lampiran 2 Matrik Invers untuk Pemodelan Plant.....	81
Lampiran 3 Program Pengujian Respon Step Aktuator.....	82
Lampiran 4 Foto Hasil Pelapisan Uji Coba Perangkat .....	83



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang**

Negara Indonesia memiliki berbagai macam suku, keberagaman ini memiliki dampak pada keberagaman budaya dan kesenian yang dimiliki. Salah satu budaya dan kesenian yang paling banyak digunakan dalam masyarakat adalah perhiasan. Perhiasan dapat digunakan sebagai aksesoris tubuh, hadiah dan sebagai pajangan atau koleksi. Bentuknya pun cukup beragam, mulai dari bentuk tradisional, ciri khas suatu daerah, binatang, hati, bulat, kotak, cincin, gelang, anting, dan bentuk-bentuk lainnya. Pada umumnya perhiasan terbuat dari logam mulia seperti emas, perak, tembaga, kuningan, nikel dan bahan-bahan lainnya. Tentunya cara pembuatan perhiasan juga berbeda-beda, salah satunya adalah melapisi logam ke benda kerja menggunakan listrik dan cairan kimia sebagai perantaranya. Metode pembuatan ini disebut dengan *Electrodeposition*. *Electrodeposition* memiliki 3 macam proses, yaitu *Electroplating*, *Heavy Deposition* dan *Electroforming* (Leslie Curtis, 2004, p. 10). Saat ini metode yang digunakan dan cukup umum di Malang adalah *ElectroPlating* dan *ElectroForming*.

*Electroforming* adalah suatu proses pengendapan zat atau ion-ion logam pada benda kerja isolator dengan cara elektrolisis, pengendapan pada benda kerja ini disebabkan adanya ion-ion bermuatan listrik yang berpindah dari suatu elektroda melalui elektrolit (Saleh, Azhar A. 2014, p. 4). Hasil perhiasan menggunakan electroforming cukup unik, karena bahan yang digunakan berasal dari benda-benda disekitar lingkungan seperti daun kering, serangga kering, ranting-ranting pohon, hasil cetakan 3 dimensi dan bahan-bahan lainnya. Cara bahan isolator agar dapat terlapisi logam adalah dengan menambahkan bahan kimia tambahan, yaitu grafit. Grafit adalah salah satu karbon allotropes dengan struktur heksagonal dan memiliki kemampuan konduktor yang baik (Yasser Mahmoodi & Davood Fathi, 2016, p. 1805). Berdasarkan jenis bahan kimia yang digunakan, *electroforming* memiliki beberapa jenis, yaitu jenis perak (*silver solution*), jenis tembaga asam (*acid copper solution*) dan jenis emas (*Gold solution*)

Saat ini pengrajin perhiasan *electroforming* di Malang banyak menggunakan jenis *electroforming* tembaga asam. Namun mereka banyak yang mengalami kegagalan di dalam proses pelapisannya, seperti perhiasan yang memiliki warna terbakar, dan pelapisan yang tidak merata. Hal ini tentu membuat kerugian dan menjadi masalah bagi pengrajin. Permasalahan ini terjadi karena perubahan nilai resistansi akibat pengendapan logam di benda kerja tersebut. Awalnya, nilai resistansi sama dengan nilai resistansi grafit yang dilekatkan pada benda kerja, kemudian akan berkurang nilai resistansinya. Nilai resistansi ini berbanding terbalik dengan banyaknya logam yang terendap. Dampak dari fenomena tersebut adalah terjadinya perubahan arus listrik yang semakin membesar. Artinya untuk mendapatkan hasil perhiasan yang merata dan warna yang tidak terbakar, dibutuhkan arus yang konstan dan nilai arus sesuai luas permukaan benda kerjanya.

Maka berbekali latar belakang masalah tersebut, diajukanlah salah satu solusi dengan merancang bangun catu daya terkontrol untuk *electroforming* jenis tembaga asam. Catu daya yang dihasilkan dari penelitian ini memiliki kemampuan menentukan nilai arus sesuai luas permukaan benda kerja yang akan dilapisi logam, menentukan lama waktu pelapisan untuk menghasilkan ketebalan yang diinginkan, dan mengontrol arus agar konstan. Resolusi nilai arus yang bisa diberikan adalah  $10mA$ , dan maksimal arus sebesar  $3A$ . Catu daya otomatis ini menggunakan sensor arus dan sensor tegangan. Selain itu catu daya otomatis ini menggunakan aktuator berupa konverter DC ke DC tipe diskrit, yaitu *Buck Converter*. *Buck Converter* dipilih karena konverter tipe ini memiliki daya disipasi yang lebih kecil dibandingkan tipe analog dan memiliki resolusi yang dapat disesuaikan dengan pulsa (PWM) yang diberikan (Cristri, A & W.a. Iskandar, R.F, 2017, p. 398). Sebelum menentukan jenis kontrol yang akan digunakan, maka akan dilakukan ujicoba-ujicoba untuk menentukan karakteristik dan persamaan matematika dari *electroforming* jenis tembaga asam. Menggunakan karakteristik dan persamaan matematika tersebut, maka bisa ditentukan kontroler yang akan digunakan.

Hasil rancang bangun ini kedepannya dapat mengotomasi pelapisan logam, sehingga mengurangi kegagalan dan mengefesiensikan pelapisan yang dilakukan oleh pengrajin perhiasan baik pemula ataupun yang berpengalaman.

## 1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan diteliti berfokus pada:

1. Bagaimana karakteristik dari *electroforming* jenis tembaga asam?

2. Bagaimana pemodelan matematika *electroforming* jenis tembaga asam?
3. Bagaimana pemodelan matematika *buck converter* sebagai aktuator kontrol untuk menghasilkan resolusi arus listrik 10mA?
4. Kontroler apa yang terbaik untuk digunakan untuk mengontrol arus?
5. Bagaimana mensimulasikan *control plant*?
6. Bagaimana mengimplementasikan hasil simulasi ke dalam bentuk perangkat keras?

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan dari rumusan masalah di atas dan untuk mengukur keberhasilan penelitian, perlu ditetapkan tujuan penelitian yaitu:

1. Memperoleh catu daya otomatis untuk mengontrol pelapisan *electroforming* jenis tembaga asam.
2. Menentukan kontrol terbaik untuk mengontrol arus agar selalu konstan.

### **1.4. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Membantu pengrajin perhiasan untuk menghasilkan produk yang unggul.
2. Mempermudah pelapisan *electroforming* untuk pengrajin pemula.
3. Mengurangi tingkat kegagalan dalam pelapisan *electroforming*.
4. Dari sisi akademik sebagai kontribusi berupa pengetahuan tentang penggunaan metode *electroforming* pada perhiasan. Sehingga dapat digunakan sebagai bahan referensi ilmiah bagi yang membutuhkan.





## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Sebelumnya, telah dibahas latar belakang penelitian, rumusan masalah, hingga manfaat dari penelitian yang akan dilakukan. Untuk menunjang hal tersebut, maka dibutuhkan kajian teori termasuk penelitian-penelitian yang terkait untuk menghasilkan sebuah karya yang mantap dan solid. Secara umum dalam pembuatan dan penelitian catu daya terkontrol ini membutuhkan penyearah atau *rectifier* untuk mengubah sinyal listrik *a.c* menjadi *d.c*, keluaran penyearah ini kemudian diturunkan menggunakan regulator yang menjadi bagian dari *plant* dan akan dikontrol arusnya agar konstan selalu.

Kajian teori merupakan subbab penting yang membahas bagian-bagian penelitian. Yaitu, mengkaji tentang *electroforming* yang berisi tentang sejarahnya, komposisi kimia dan instalasi peralatan-peralatan yang dibutuhkan. Lalu, dibahas catu daya *switch-mode*, regulator jenis *Pulse Width Modulated* (PWM) *switching*. Dalam penggunaan kontrol PID, hal yang penting adalah *tuning* konstanta dari kontrol P, kontrol I dan kontrol D, sehingga perlunya membahas *tuning* menggunakan metode kedudukan akar-akar atau yang umum diucapkan *root locus*.

#### 2.1. Penelitian Terkait

Leslie Curtis membuat sebuah karya ilmiah yang dituangkan dalam bukunya dan diterbitkan tahun 2004. Judul bukunya adalah *Electroforming Jewellery Handbooks*, Leslie Curtis melakukan penelitian pada *electroforming* dengan jenis yang berbeda-beda. Yaitu jenis tembaga asam, nikel, emas dan perak. Hasil penelitiannya adalah komposisi larutan elektrolisis, besarnya arus listrik dan lamanya waktu pelapisan untuk mendapatkan tebal pengendapan logam.

Mahajan Sagar dan kawan-kawan melakukan penelitian (2016) untuk pemodelan *DC-DC Current Buck Converter* untuk beban yang membutuhkan arus listrik konstan. Pada dasarnya mereka menggunakan *Buck Converter* ini setelah *rectifier*, dua hal tersebut disatukan dalam bentuk pemodelan matematika yang disimulasikan di dalam MATLAB dalam bentuk blok transformator (Mahajan Sagar Bhaskar Ranjana, S. M. Badave,

Pandav Kiran Maroti, S. M. Mule, Rishi M. Kulkarni, 2016). Hasil penelitian berupa respon-respon yang akan berguna sebagai acuan perancangan, kekurangan penelitiannya adalah respon tidak variatif karena beban yang diuji, nilai induktor dan kapasitor digunakan hanya 1 jenis saja.

Analisis yang lebih baik lagi untuk mengatasi kekurangan penelitian Mahajan Sagar adalah menggunakan penelitian Cristy, A. W dan Iskandar, R. F (2017). Mereka melakukan pemodelan *buck converter* secara sederhana dan melihat respon perubahan dengan nilai induktor, kapasitor dan beban yang bervariasi. Metode penelitian dilakukan dengan cara membandingkan hasil perhitungan dari pemodelan matematika dan perangkat lunak analisis yang bernama LTSPICE (Cristi. A.W.a, Iskandar, R.F, 2016. p. 398). Hasilnya adalah nilai induktor dan kapasitor terbaik untuk beban tertentu.

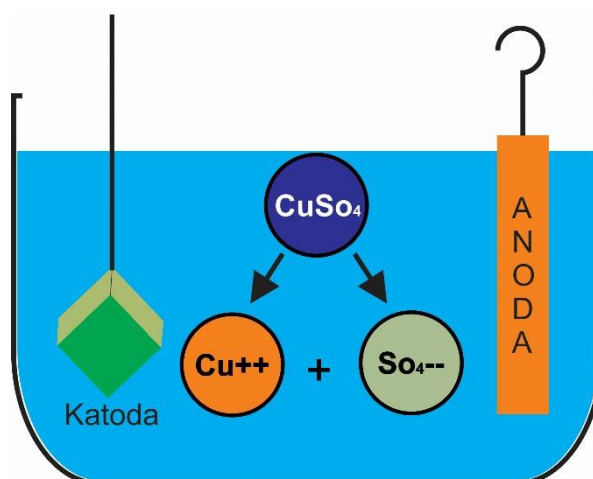
Kontrol digital PID pada *buck converter* pernah dilakukan oleh Chao-Ying Wang dan kawan-kawan, jurnal tersebut dipublikasi IEEE tahun 2015. *Tuning PID* menggunakan *Root Locus*, analisis dilakukan menggunakan SIMULINK MATLAB. Arus yang bekerja kecil yaitu  $5mA$  dengan nilai hambatan  $360\Omega$ . Pengaturan PWM menggunakan rangkaian digital analog, terdiri dari Flip-flop dan pengkondisian sinyal DAC (*Digital to Analog Converter*).

## **2.2.Kajian Teori**

### **2.2.1 Electroforming**

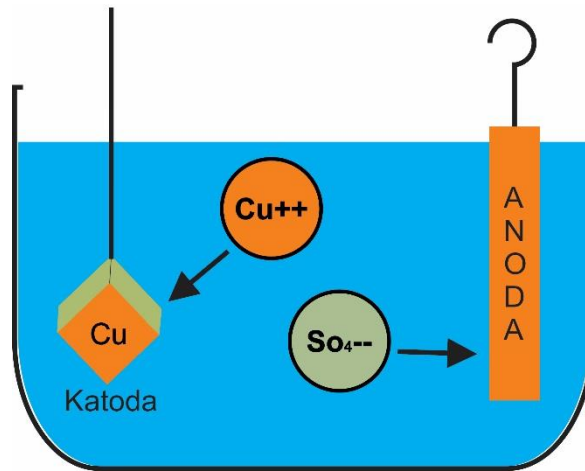
Elektro deposisi adalah sebuah proses pengendapan logam ke objek lain menggunakan elektrolisis, salah satu jenis dari elektro deposisi adalah *electroforming*. *Electroforming* ini memiliki sejarah yang cukup panjang, yaitu kurang lebih 150 tahun yang lalu. Di tahun 1799, seorang ilmuwan bernama Volta menemukan baterai. Tahun 1803 baterai digunakan untuk *electroplating* oleh Brugnatelli. Berselang 8 tahun kemudian, untuk pertama kalinya dalam sejarah, Jacobi melakukan pengendapan logam menggunakan *electroforming* pada papan pencetak uang. Komersialisasi *electroplating* tercatat pada tahun 1830-an oleh Elkingtons di kota Brimingham. Michael Faraday (1791-1867) atau yang dikenal dengan bapak *electroplating*, merumuskan hukum dasar ilmu elektro deposisi pada tahun 1833. Kemudian berjalan 8 tahun, Elkingtons mengkomersialisasi *electroforming*. Ditahun 1966 The Investiture Crown for The Principality of Wales menjadi industri terbesar di dunia untuk *electroforming* emas di bawah perusahaan BJS Ltd dan *Engelhard Industries* (Leslie Curtis, 2004, p. 10).

Elektro deposisi menggunakan hukum Faraday yang berbunyi, *“berat logam yang diendapkan berbanding lurus dengan besarnya arus dan waktu yang diperlukan, untuk kuantitas arus yang sama maka berat logam diendapkan berbanding lurus dengan bahan kimia yang digunakan (berat suatu unsur yang akan menggantikan atau menggabungkan delapan bagian dari berat oksigen dalam sekali reaksi)”* (Leslie Curtis, 2004, p. 10).



Gambar 2. 1 Susunan kimi tembaga sulfat  
(Leslie Curtis, 2004, p. 24)

Larutan utama yang digunakan dalam *electroforming* jenis tembaga asam adalah Tembaga Sulfat ( $\text{CuSO}_4$ ), terdiri dari 2 senyawa kimia seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1. Saat Tembaga sulfat ( $\text{CuSO}_4$ ) bercampur air diberikan arus listrik, maka Tembaga sulfat ( $\text{CuSO}_4$ ) terurai menjadi partikel tembaga ( $\text{Cu}$ ) dan partikel sulfat ( $\text{SO}_4$ ). Partikel-partikel tersebut memiliki muatan listrik, partikel bermuatan listrik disebut sebagai ion. Ion logam tembaga bermuatan positif ( $\text{Cu}^{++}$ ) disebut dengan kation, sedangkan ion sulfat nonlogam bermuatan negatif ( $\text{SO}_4$ ) disebut anion. Ion sulfat telah memigrasikan ikatan kimia yang kuat dan tidak terurai menjadi komponen-komponennya yang membentuk bagian-bagian sulfur dan oksigen.

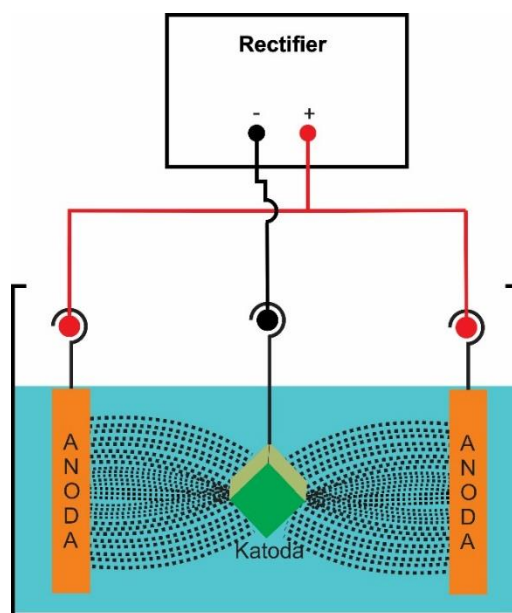


Gambar 2. 2 Arah penguraian ion-ion logam  
(Leslie Curtis, 2004, p. 25)

Hal ini memungkinkan arus listrik lewat untuk mendorong anion dan kation bergerak ke arah yang berbeda. Dalam rangkaian listrik, arus mengalir dari positif ke negatif. Jika arus listrik dilewatkan, kation berpindah ke arah katoda (titik dimana logam akan diendapkan), mereka membentuk kisi logam (dalam hal ini, dari tembaga). Sedangkan ion sulfat berpindah ke arah anoda. Proses ini disebut korosi dan dapat dilihat dalam Gambar 2.2.

Korosi pada anoda harus berbanding lurus dengan pengendapan logam di katoda. Jika tidak, penipisan ion logam akan terjadi dan prosesnya melambat atau bahkan berhenti. Ada dua metode untuk mengatasi hal tersebut, yaitu memberikan logam anoda yang lebih banyak dibandingkan luasan katodanya (benda kerja) atau menambah tingkat asam dalam larutannya.

Peletakan katoda untuk mendapatkan hasil yang merata adalah dengan meletakkannya di tengah, diantara anoda yang terpasang paralel seperti pada Gambar 2.3, hal ini dimaksudkan agar muatan yang membawa logam melapisi 2 sisi sekaligus pada benda kerjanya.



Gambar 2. 3 Penempatan katoda dalam pelapisan logam  
(Leslie Curtis, 2004, p. 48)

Jika anoda diisi dengan bahan logam yang terbuat dari tembaga, dibutuhkan larutan dasar untuk menunjang pelapisan yang baik yaitu:

- 200 g/liter tembaga sulfat
- 56 g (30,5 ml)/liter *sulphuric acid* (*Brightener*)
- Air ionisasi
- 12 g/liter *potassium aluminium sulphate* / *Chloride ion* (*carrier*)

Standar kecepatan pelapisan yang dihasilkan dari larutan kimia di atas adalah 0,071 mm/h pada arus listrik 5A/square decimeter. Larutan kimia ini memiliki *range* dan nilai optimal seperti yang dijelaskan dalam Tabel 2.1, sedangkan untuk standar tebalnya pelapisan terdapat dalam Tabel 2.2. Tebalnya pelapisan pada Tabel 2.2 berdasarkan perhitungan yang memiliki efisiensi 95-97 %.

Tabel 2. 1 Kapasitas kemampuan larutan kimia pada *electroforming an acid copper*  
(Leslie Curtis, 2004, p. 80)

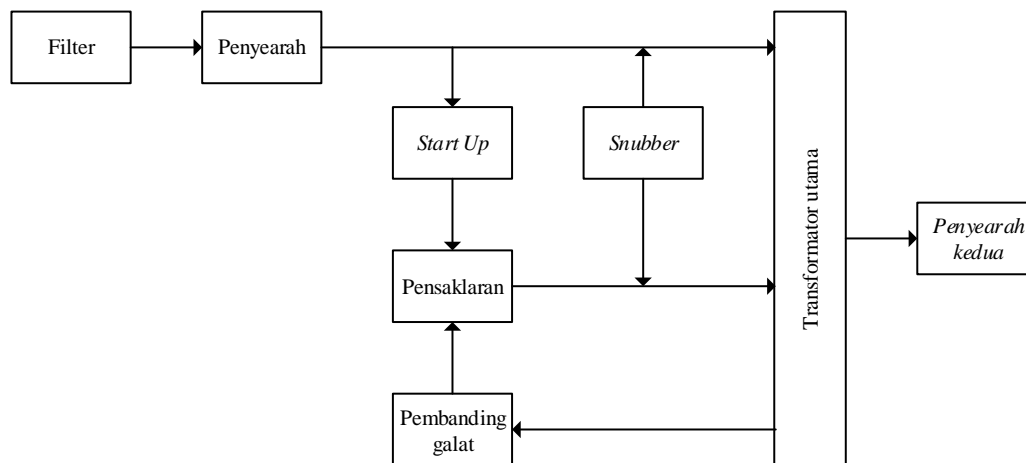
	Range	Optimal
Suhu	15-30 °C	18-22 °C
Besar arus listrik	1,5-6,0 $\frac{A}{dm^2}$	2,5-4,0 $\frac{A}{dm^2}$
<i>Copper sulphate</i>	170-200 $\frac{g}{liter}$	180-200 $\frac{g}{liter}$
<i>Sulphuric acid</i>	25-40 $\frac{g}{liter}$	28-32 $\frac{g}{liter}$
<i>Chloride ion</i>	60-120 ppm	80-100 ppm

Tabel 2. 2 Hasil perhitungan kecepatan deposisi pada tembaga  
(Leslie Curtis, 2004, p. 131)

Besar arus listrik ( $A/dm^2$ )	Copper (Acid)	
	Tebal ( $\mu m/h$ )	Waktu yang dibutuhkan untuk 1 mm (h)
0.5	6.665	150
0.6	7.998	135
0.7	9.331	120
0.8	10.664	105
0.9	11.997	90
1.0	13.33	75
1.1	14.663	70
1.2	15.996	65
1.3	17.329	60
1.4	18.662	55
1.5	19.995	50
1.6	21.328	47.5
1.7	22.661	45
1.8	23.994	42.5
1.9	25.327	40
2.0	26.66	37.5
2.1	27.993	36
2.2	29.326	34.5
2.3	30.659	33
2.4	31.992	31.5
2.5	33.325	30
3.0	39.99	25
3.5	46.655	21.43
4.0	53.32	18.75
4.5	59.985	16.67
5.0	66.65	15

### 2.2.2 Catu Daya

Sinyal AC dari tegangan jala-jala 220VAC disearahkan lebih dahulu menjadi tegangan searah melalui rangkaian dioda dan kapasitor elko. Tegangan keluaran dari penyerah kemudian disakelar aktif dan mati secara terus menerus dengan frekuensi tertentu, hal ini memungkinkan menggunakan nilai induktor dari trafo menjadi kecil. Dampak dari rangkaianannya adalah dapat memperkecil ukuran dari catu daya yang dibuat, diagram blok secara umum dapat dilihat dalam Gambar 2.4.

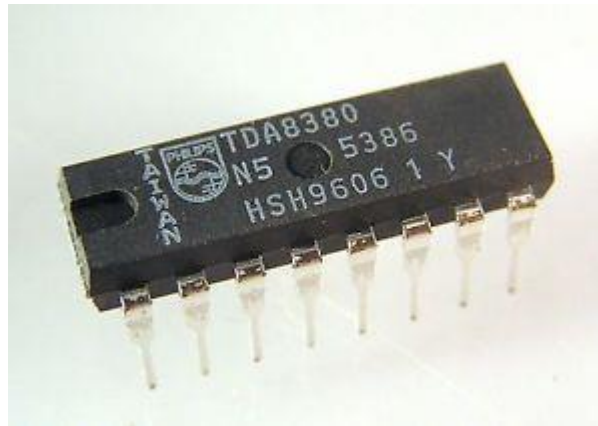


Gambar 2. 4 Blok diagram penyearah pensaklaran (*switch-mode*)

Transformator dalam *Switched-Mode Power Supply* (SMPS), biasanya bekerja pada frekuensi 30 hingga 40KHz. Dampaknya adalah dimensi transformator menjadi ringkas, karena frekuensi kerjanya yang tinggi tersebut maka inti dari transformator tidak lagi menggunakan plat besi, tetapi sudah menggunakan ferit (besi oksida) yang mempunyai kemampuan magnetisasi dan demagnetisasi lebih cepat daripada besi biasa.

Dalam kenyataannya, tegangan sumber dari jala-jala listrik pasti memiliki gangguan-gangguan berupa frekuensi yang liar. Apabila ini dibiarkan, tentu akan merusak catu daya yang telah didesain. Untuk mengatasi itu, maka dibutuhkan *Line Filter*. *Line filter* dibentuk dari induktor-induktor dan kapasitor-kapasitor yang dipasang secara seri terhadap tegangan masukan.

Karena frekuensi 30 hingga 40KHz tidak ditemukan pada tegangan DC, maka sistem SMPS harus membuat atau menggenerasikan sendiri pulsa atau denyut tersebut. Metode paling sering ditemukan yaitu *self oscillating*. Rangkaian SMPS ibarat rangkaian osilator frekuensi daya tinggi. Tidak jarang juga ditemukan SMPS dipasaran menggunakan IC untuk membuat pulsa tersebut, misalnya TDA8380, TEA2261, STR-group dll. Dalam setiap sistem osilator, dibutuhkan tegangan awal/pemicu yang berfungsi sebagai pemicu awal rangkaian osilator untuk beresilasi. Tegangan pemicu ini muncul beberapa saat setelah SMPS mendapat tegangan masukan. Besarnya tegangan pemicu ini tergantung dari jenis rangkaian SMPS yang digunakan. Karena hanya memiliki sifat pemicu, tegangan ini tidak dipakai lagi ketika SMPS sudah bekerja.



Gambar 2. 5 IC pembangkit pulsa atau denyut dalam SMPS  
(Rich Electronics, 2019, richelectronics.co.uk)

*Switcher* berfungsi sebagai pensakelaran utama transformator, pada umumnya menggunakan MOSFET. Karakteristik *switcher* harus mampu menahan arus kolektor atau *drain* yang cukup besar untuk menahan tegangan pada lilitan primer transformator. Arus ini bukan arus konstan, melainkan arus sesaat yang tergantung lebar pulsa yang menggerakkan. Selain kemampuan arus, MOSFET harus mempunyai frekuensi kerja yang cukup untuk digunakan sebagai pensakelaran.

SMPS memiliki feedback yang berfungsi sebagai penstabil tegangan keluaran, yaitu rangkaian *Error Amp/Detector*. Pada prinsipnya, rangkaian ini membandingkan tegangan keluaran (diambil dari lilitan sekunder transformator) dengan tegangan referensi yang stabil. Tatkala tegangan keluaran terlalu tinggi, rangkaian ini akan memberitahu rangkaian primer atau *switcher* utama untuk segera menurunkan tegangan. Kunci dari *AutoVoltage* berada pada blok ini. Tegangan sekunder yang dihasilkan dinaikkan dengan cara melebarkan pulsa, dan sebaliknya untuk menurunkan tegangan output dengan cara menyempitkan pulsa yang masuk ke pensakelaran. Lokasi rangkaian ini dapat ditemukan di bagian primer (*hot area*) atau bisa ditemukan di bagian sekunder (*non hot area*). Pada model-model SMPS terdahulu, sering dijumpai pada primer. SMPS yang lebih baru dapat dijumpai pada bagian sekunder dengan menggunakan optocoupler (contoh PC817, P721, P621 dll) sebagai lintasan sekaligus isolator rangkaian *Error Amp*. *Sanken Error* (SE090, SE115) merupakan *IC error amp* yang sering dipakai pada SMPS saat ini. SE090, SE110, SE115 dan SE lainnya merupakan buatan *Sanken/Allegro Semiconductor*.

*Snubber circuit* berfungsi sebagai peredam tegangan balik akibat fenomena pensakelaran magnet di dalam MOSFET, selain itu rangkaian ini juga dipakai untuk



menentukan frekuensi kerja trafo. Ciri utama *snubber circuit* adalah tersusun dari kombinasi C dan R (dalam beberapa jenis terdapat dioda) yang dipasang secara paralel terhadap lilitan primer trafo.

Tegangan pada sekunder transformator bukan dalam bentuk AC, melainkan DC yang berbentuk pulsa. Tegangan yang muncul pada sekunder transformator disearahkan dan difilter untuk menghasilkan tegangan DC sekunder. Karakteristik penyearah harus berjenis *fast rectifier*, misalnya UF4002. *Fast rectifier* dimaksudkan untuk mampu menyearahkan pulsa dengan frekuensi tinggi. Kapasitor Elko perata cukup menggunakan ukuran beberapa ratus  $\mu\text{F}$ , karena frekuensi tegangan yang keluar dari transformator cukup tinggi (tergantung frekuensi kerja SMPS).

Blok proteksi yang penting untuk mengamankan SMPS yaitu:

- OVP (*over voltage protector*) berfungsi untuk mendeteksi tegangan yang berlebihan. Blok ini akan mematikan SMPS jika terdeteksi tegangan yang lebih.
- OCP (*Over Current Protection*), berfungsi untuk mendeteksi beban lebih, SMPS akan mati jika terdeteksi pemakaian lebih pada bebannya.
- OHP (*over heat protection*), jika terlalu panas, SMPS akan *shutdown* dengan sendirinya.

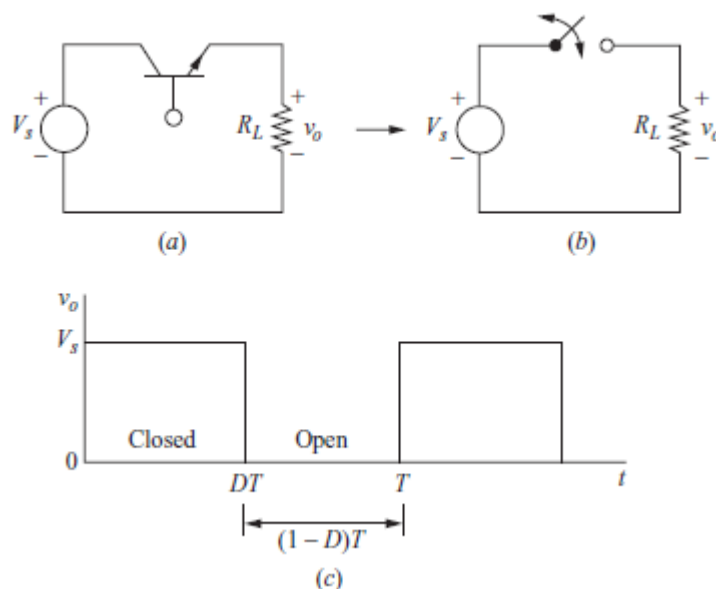
### 2.2.3 Regulator

Regulator adalah pengubah tegangan searah (d.c) ke tegangan searah (d.c) yang levelnya berbeda, bisa mengubah tegangan yang lebih tinggi dari tegangan masukannya atau mengubah tegangan yang lebih rendah dari tegangan masukannya (Daniel W. Hart, 2011, p. 196). Terdapat 3 jenis regulator berdasarkan jenis teknologinya, yaitu *linier regulator*, *Pulsewidth modulated (PWM) switching power supplies*, dan *High efficiency resonant technology switching power supplies* (Marty Brown, 2001, p. 4). Perbedaan ketiga jenis tersebut dapat dilihat dalam Tabel 2. 3.

Tabel 2. 3 Perbandingan 3 teknologi regulator  
(Marty Brown, 2001)

	Linier regulator	PWM Switching Regulator	Resonant Transition Switching Regulator	Quasi-Resonant Switching Regulator
Harga	Murah	Mahal	Mahal	Sangat mahal
Berat	Berat	Ringan-sedang	Ringan-sedang	Ringan-sedang
Efesiensi	30-50%	70-85%	78-92%	78-92%
Keluaran Ganda	Tidak	Iya	Iya	Iya

Dalam rangkaian konverter *switching*, transistor beroperasi sebagai sakelar elektronik dengan menjadi benar-benar hidup atau mati sepenuhnya (saturasi atau *cutoff* untuk BJT atau triode dan daerah *cutoff* MOSFET). Rangkaian ini juga dikenal sebagai *chopper dc*. Dengan asumsi sakelar ideal pada Gambar 2.6, keluaran sama dengan masukan ketika sakelar ditutup, dan keluarannya nol ketika sakelar terbuka. Pembukaan dan penutupan sakelar secara berkala menghasilkan keluaran pulsa yang ditunjukkan pada Gambar 2.6(c). Maka rata-rata tegangan keluarannya menjadi Persamaan 2.1. Tegangan rata-rata ini tergantung pada *duty cycle*, *duty cycle* merupakan fraksi dari periode *switching* disaat sakelar ditutup. Maka persamaan *duty cycle* terhadap variabel waktu dan frekuensi ditunjukkan dalam Persamaan 2.2.



Gambar 2. 6 (a) Dasar *DC-DC converter* (b) Rangkaian setara *DC-DC Converter* (c)  
Sinyal tegangan keluaran  
(Daniel W. Hart, 2011, p. 197)

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s(t) dt = V_s D \quad (2.1)$$

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f \quad (2.2)$$

Keterangan:

$V_o$  = Tegangan keluaran (Volt)

$T$  = Periode (detik)

$V_s(t)$  = Tegangan masukan sesaat (Volt)

$V_s$  = Tegangan masukan (Volt)

$D$  = *Duty Cycle*

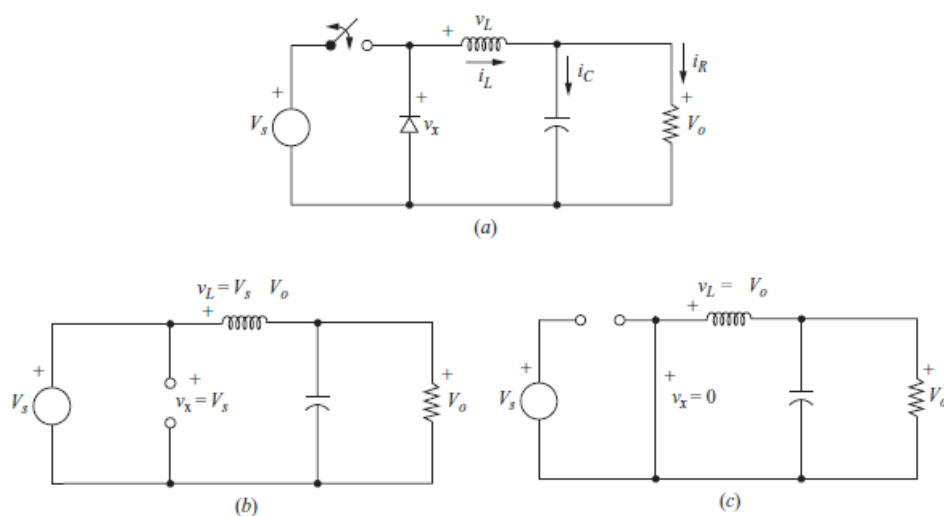
$t_{on}$  = Waktu lamanya sinyal *HIGH* (detik)

$t_{off}$  = Waktu lamanya sinyal *Low* (detik)

$f$  = Frekuensi (Hz)

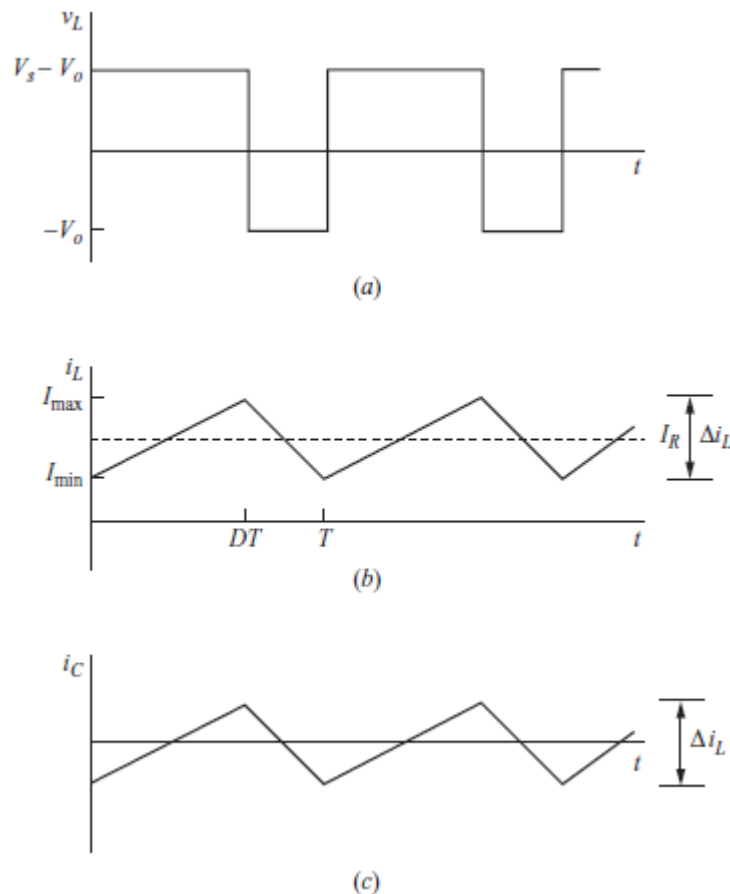
Daya yang diserap oleh sakelar ideal adalah nol. Saat sakelar terbuka, tidak ada arus di dalamnya; ketika sakelar ditutup, tidak ada tegangan di atasnya. Karena itu, semua daya diserap oleh beban, dan efisiensi energi adalah 100 persen. Kerugian akan terjadi dalam sakelar nyata karena tegangan yang melintasinya tidak akan nol ketika sakelar aktif, dan sakelar harus melewati wilayah linier saat melakukan transisi dari satu kondisi ke kondisi lainnya.

Terdapat 2 tipe regulator dalam jenis ini, yaitu *Buck Converter* yang berfungsi menurunkan tegangan dan *Boost Converter* yang berfungsi untuk menaikkan tegangan. Untuk menganalisis *Buck Converter* perlunya kita mengetahui hubungan antara tegangan dan arus yang bekerja dalam rangkaian *Buck converter* seperti pada Gambar 2. 7.



Gambar 2. 7 (a) Rangkaian *Buck Converter* (b) Rangkaian setara saklar tertutup (c) Rangkaian setara saklar terbuka  
(Daniel W. Hart, 2011, p. 199)

Ketika sakelar ditutup pada rangkaian *buck converter* pada Gambar 2. 7(a), dioda dibiaskan terbalik. Gambar 2. 7(b) adalah rangkaian setaranya. Tegangan di induktor ditunjukkan dalam Persamaan 2. 3. Ketika sakelar terbuka, dioda menjadi bias maju untuk membawa arus induktor dan rangkaian setaranya terdapat pada Gambar 2. 7(c). Bentuk gelombang pada kapasitor dan induktor dari fenomena di Gambar 2.7 ditunjukkan dalam Gambar 2. 8.



Gambar 2. 8 Bentuk gelombang *Buck Converter*: (a) arus induktor (b) arus induktor (c) arus kapasitor

(Daniel W. Hart, 2011, p. 201)

Operasi *steady-state* mensyaratkan bahwa arus induktor pada akhir siklus *switching* harus sama dengan awal, artinya perubahan bersih dalam arus induktor selama satu periode adalah nol. Menggunakan Persamaan 2. 3 dan Persamaan 2. 4 yang dimasukkan ke dalam Persamaan 2. 5 maka kita akan mendapatkan bentuk sederhana dalam Persamaan 2. 6 setelah melakukan operasi matematika. Persamaan 2. 6 inilah yang digunakan untuk mengetahui tegangan keluaran dari *buck converter* yang digunakan.

$$(\Delta I_L)_{closed} = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (2.3)$$

$$(\Delta I_L)_{open} = -\left( \frac{V_o}{L} \right) (1 - D)T \quad (2.4)$$

$$(\Delta I_o)_{open} + (\Delta I_o)_{closed} = 0 \quad (2.5)$$

$$V_o = V_s D \quad (2.6)$$

Keterangan:

$(\Delta I_L)_{open}$	= Selisih arus saat saklar terbuka pada induktor $I_{max}$ dan $I_{min}$ (Ampere)
$(\Delta I_L)_{closed}$	= Selisih arus saat saklar tertutup pada induktor $I_{max}$ dan $I_{min}$ (Ampere)
$V_s$	= Tegangan masukan (Volt)
$V_o$	= Tegangan keluaran (Volt)
$D$	= <i>Duty Cycle</i>
$T$	= Periode (detik)

Arus induktor rata-rata harus sama dengan arus rata-rata pada beban, karena arus kapasitor rata-rata harus nol untuk operasi *steady state*, maka Persamaan 2.7 mempersentasikan fenomena tersebut. Dengan mensubtitusikan Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4 kedalam Persamaan 2.7, maka dapat diketahui arus minimum (Persamaan 2.8) dan maksimum (Persamaan 2.9) dari *Buck Converter* yang telah didesain.

$$I_L = I_R = \frac{V_o}{R} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} I_{min} &= I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \\ &= \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[ \frac{V_o}{L} (1 - D)T \right] = V_o \left( \frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} I_{max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\ &= \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left[ \frac{V_o}{L} (1 - D)T \right] = V_o \left( \frac{1}{R} + \frac{1-D}{2Lf} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Keterangan:

$V_o$	= Tegangan keluaran (Volt)
$D$	= <i>Duty Cycle</i>
$T$	= Periode (detik)
$R$	= Hambatan (Ohm)
$L$	= Induktor (mH)
$f$	= Frekuensi (Hz)

$\Delta i_L$  = Selisih arus pada induktor (Ampere)  
 $I_{min}$  = Arus keluaran minimum (Ampere)  
 $I_{max}$  = Arus keluaran maksimum (Ampere)

Sedangkan untuk menganalisis tegangan keluaran *ripple Buck Converter*, maka erat hubungannya dengan kapasitor. Kapasitor diasumsikan sangat besar untuk menjaga tegangan keluaran konstan. Walaupun dalam kenyatannya, tegangan keluaran tidak dapat dijaga konstan sempurna dengan kapasitansi terbatas. Variasi dalam tegangan keluaran atau riak, dihitung dari hubungan tegangan-arus kapasitor. Arus dalam kapasitor direpresentasikan didalam Persamaan 2.10 dan Gambar 2.9(a). Selama kapasitor memiliki arus yang positif maka didapatkan Persamaan 2.11.

$$I_C = i_L - i_R \quad (2.10)$$

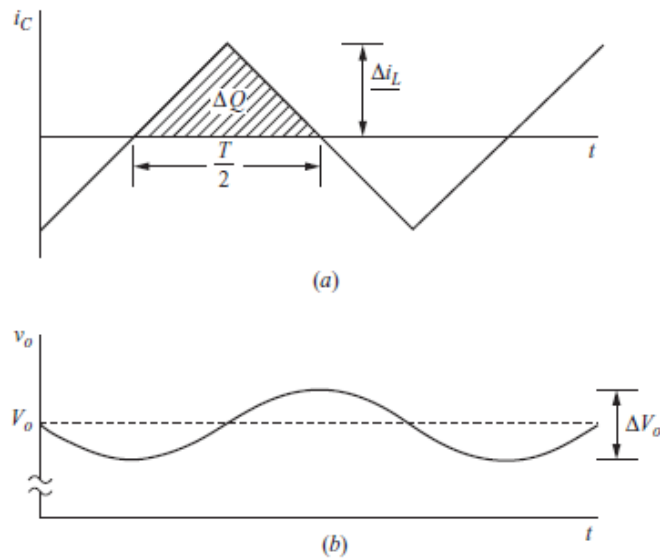
$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (2.11)$$

Menggunakan Persamaan 2.4 dan mensubstitusikan ke dalam Persamaan 2.11, maka kita akan mendapatkan bentuk sederhana dari pengoperasian matematika pada Persamaan 2.12, dan persamaan ini yang digunakan untuk mencari Tegangan keluaran *ripple* yang diinginkan serta bentuk gelombang menjadi seperti pada Gambar 2.9(b).

$$\Delta V_o = \frac{TV_o}{8CL} (1 - D)T = \frac{V_o(1 - D)}{8LCf^2} \quad (2.12)$$

Keterangan:

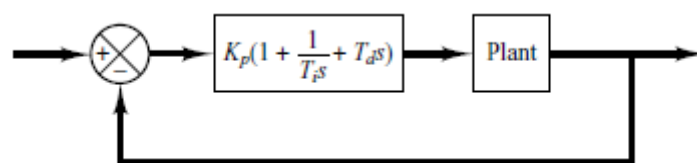
$\Delta V_o$  = Tegangan keluaran *ripple* (Volt)  
 $\Delta i_L$  = Arus *ripple* pada Induktor (Ampere)  
 $V_o$  = Tegangan keluaran (Volt)  
 $D$  = *Duty Cycle*  
 $T$  = Periode (detik)  
 $C$  = Kapasitor (uH)  
 $L$  = Induktor (mH)  
 $f$  = Frekuensi (Hz)  
 $\Delta i_L$  = Selisih arus pada induktor (Ampere)  
 $i_L$  = Arus yang melalui induktor (Ampere)  
 $i_R$  = Arus yang melalui beban (Ampere)



Gambar 2. 9 Bentuk gelombang tegangan keluaran *ripple*: (a) Arus kapasitor (b) Tegangan *ripple* kapasitor  
(Daniel W. Hart, 2011, p. 204)

#### 2.2.4 Kontrol PID

Kegunaan kontrol PID terletak pada penerapannya secara umum untuk sebagian besar sistem kontrol. Gambar 2.10 merupakan contoh blok diagram kontrol PID pada sebuah plant untuk *loop* tertutup. Jika sebuah model matematis dari sebuah plant dapat diturunkan, maka kita dapat menentukan spesifikasi transien dan kondisi *steady-state* pada sistem *loop* tertutup. Namun, apabila sebuah plant sangatlah rumit dan model matematisnya tidak dapat diperoleh dengan mudah. Maka untuk mengatasi masalah tersebut harus menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengatur parameter-parameter kontrol PID. Salah satu metode untuk menentukan parameter-parameter kontrol PID adalah *Root Locus*.



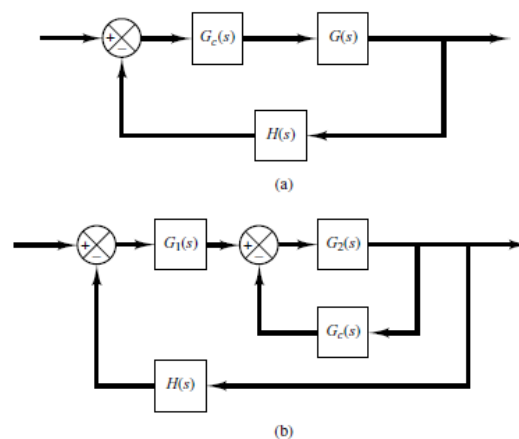
Gambar 2. 10 Sistem PID dengan loop tertutup  
(Katsuhiko Ogata, 2010, p. 411)

Desain dengan metode *root-locus* didasarkan pada pembentukan kembali kedudukan akar dari sistem dengan menambahkan kutub dan nol ke fungsi transfer sistem *loop* terbuka, dan memaksa kedudukan akar untuk melewati kutub *loop* tertutup yang diinginkan disebuah *plant*. Karakteristik dari desain *root-locus* ini didasarkan pada asumsi, bahwa sistem *loop*

tertutup memiliki sepasang kutub *loop* tertutup yang dominan. Artinya, efek nol dan kutub tambahan tidak mempengaruhi karakteristik respons yang banyak.

Dalam merancang sistem kontrol, selain penyesuaian perolehan parameter lainnya diperlukan. Kita harus memodifikasi kedudukan akar asli dengan memasukkan kompensator yang sesuai. Setelah efek pada kedudukan akar dari penambahan kutub dan atau nol sepenuhnya diketahui, maka langkah selanjutnya dapat menentukan lokasi kutub dan nol kompensator yang akan membentuk kembali kedudukan akar seperti yang diinginkan. Intinya, dalam desain menggunakan metode *root-locus*, lokasi akar sistem dibentuk kembali melalui penggunaan kompensator. Sehingga sepasang kutub *loop* tertutup yang dominan dapat ditempatkan di lokasi yang diinginkan.

Gambar 2.11 menunjukkan skema kompensasi yang biasa digunakan untuk sistem kontrol umpan balik. Gambar 2.11(a) menunjukkan konfigurasi, dimana kompensator  $G_c(s)$  ditempatkan secara seri dengan instalasi. Skema ini disebut kompensasi seri. Alternatif untuk kompensasi seri adalah dengan memberi sinyal balikan dari beberapa elemen dan menempatkan kompensator di jalur umpan balik yang dihasilkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11(b). Kompensasi semacam itu disebut kompensasi paralel atau kompensasi umpan balik.



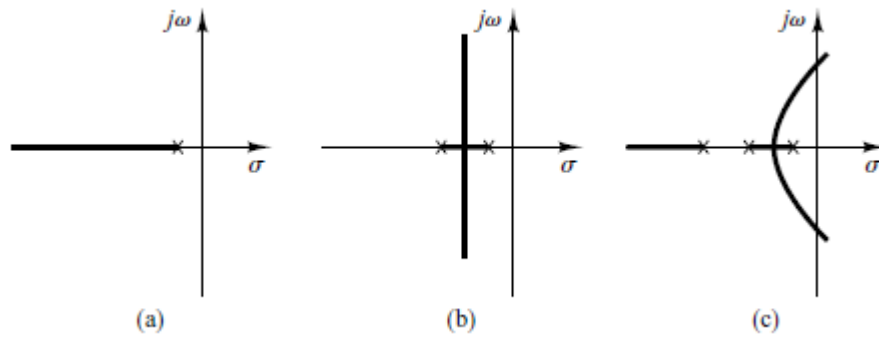
Gambar 2. 11 Blok diagram dengan kompensasi: (a) Kompensasi seri (b) Kompensasi paralel atau *feedback*  
(Katsuhiko Ogata, 2010, p. 405)



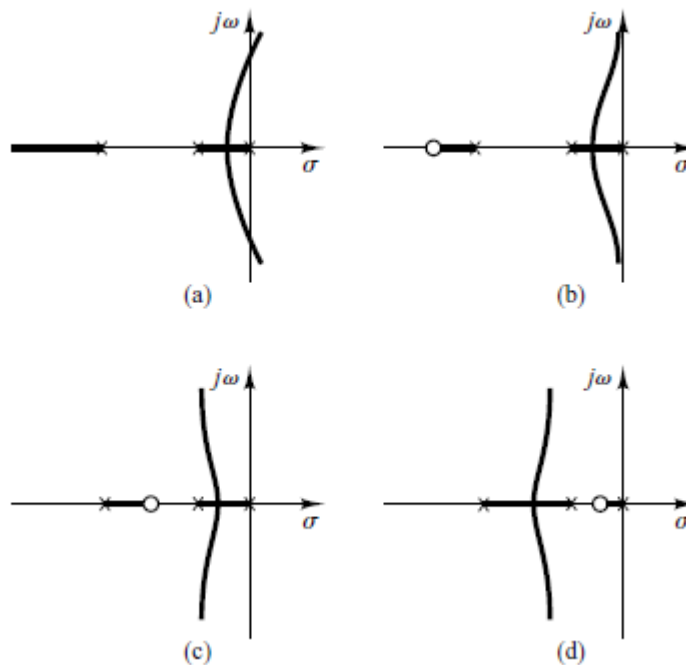
Dalam mengkompensasi sistem kontrol, masalah biasanya bermuara pada desain yang cocok dari seri atau kompensator paralel. Pilihan antara kompensasi seri dan kompensasi paralel tergantung pada sifat sinyal dari sebuah sistem, tingkat daya di berbagai titik, komponen yang tersedia, pengalaman desainer, pertimbangan ekonomi, dan sebagainya.

Secara umum, kompensasi seri lebih sederhana daripada kompensasi paralel. Namun, kompensasi seri sering membutuhkan amplifier tambahan untuk meningkatkan gain atau untuk memberikan isolasi. Secara umum jumlah komponen yang diperlukan dalam kompensasi paralel akan lebih sedikit dari jumlah komponen dalam kompensasi seri, asalkan suatu sinyal yang sesuai tersedia. Jika kompensator diperlukan untuk memenuhi spesifikasi kinerja, perancang harus merealisasikan perangkat fisik yang memiliki fungsi transfer dengan menentukan kompensator. Banyak perangkat fisik telah digunakan untuk tujuan tersebut. Apabila masukan sinyal sinusoidal diterapkan pada masukan jaringan, dan keluaran *steady-state* (yang juga sinusoidal) memiliki fasa *lag*, maka jaringan tersebut disebut *lag network*. Jika keluaran *steady-state* memiliki fasa *lead*, maka jaringan disebut *lead network*. Dalam jaringan *lag-lead*, baik *lag phase* dan *lead phase* terjadi pada keluaran tetapi di wilayah frekuensi yang berbeda, *lag phase* terjadi di wilayah frekuensi rendah dan *lag network* terjadi di wilayah frekuensi tinggi. Kompensator yang banyak digunakan adalah *lead compensator*, *lag compensators*, *lag-lead compensators*, and *velocity-feedback (tachometer) compensators*.

Penambahan *pole* ke fungsi transfer *loop* terbuka memiliki efek menarik *root-locus* ke kanan, cenderung menurunkan stabilitas relatif sistem dan memperlambat penyelesaian respons. Gambar 2.12 menunjukkan contoh *root-locus* yang menggambarkan efek penambahan kutub ke sistem kutub tunggal dan penambahannya dari dua kutub ke sistem kutub tunggal. Penambahan *zero* ke fungsi transfer *loop* terbuka memiliki efek menarik *root-locus* ke kiri, cenderung membuat sistem lebih stabil dan mempercepat penyelesaian respon. Secara fisik, penambahan *zero* dalam fungsi transfer umpan ke depan berarti penambahan kontrol turunan ke sistem. Efek kontrol tersebut adalah untuk memperkenalkan tingkat antisipasi ke dalam sistem dan mempercepat respons transien. Gambar 2.13(a) menunjukkan *root loci* untuk sistem yang stabil dengan *gain* kecil tetapi tidak stabil untuk *gain* besar. Gambar 2.13 (b), (c), dan (d) menunjukkan kurva *root-locus* untuk sistem ketika *zero* ditambahkan ke fungsi alih *loop* terbuka.



Gambar 2. 12 Kurva root-locus: (a) *Single pole system* (b) *Two pole system* (c) *three-pole system*  
(Katsuhiko Ogata, 2010, p. 408)



Gambar 2. 13 (a) Kurva *root locus* sistem 3 pole (b), (c) dan (d) kurva *root locus* dengan penambahan *zero* pada sistem  
(Katsuhiko Ogata, 2010, p. 409)

### 2.2.5 Regresi Polinomial

Regresi polinomial adalah salah satu metode dalam lingkupan metode numerik. Regresi polinomial mengacu pada aplikasi regresi dimana terdapat lebih dari satu variabel independen (Eva Ostertagová, 2012, p. 501). Regresi polinomial ini juga termasuk metode yang digunakan untuk pencocokan kurva atau *Curve Fitting*. Dasar regresi polinomial terdiri dari variabel dependen (respons) Y pada serangkaian variabel K independen (prediktor) dari variabel  $x$ . Variabel ini dapat diekspresikan ke dalam Persamaan 2.13. Variabel K dapat disebut juga orde dalam sistem regresi polinomial ini.

Untuk mendapatkan nilai-nilai dari variabel di atas sehingga terbentuk kurva yang mendekati kurva aslinya, maka titik-titik percobaan dibuat ke dalam sistem koordinat. Dari titik-titik yang telah digambar dapat diketahui pola secara umum, apakah hanya lurus atau berupa garis lengkung. Apabila lengkung dapat digunakan Persamaan 2.13, dan  $D^2$  menggunakan Persamaan 2.14.  $D^2$  adalah jumlah dari kuadrat residu antara data regresi dengan data aktual. Istilah lain dari  $D^2$  adalah kuadrat deviasi, nilai kuadrat deviasi harus dibuat semimumimum mungkin. Maka untuk mendapatkan itu, bisa digunakan Persamaan 2.15. Jika variabel  $K$  ingin dibesarkan lagi, maka akan lebih mudah dibuat dalam bentuk matriks seperti Persamaan 2.16.

$$y = a_0 + a_1x^1 + a_2x^2 + \dots + a_kx^n, \text{ untuk } k = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

$$D^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x^1 - a_2x^2 - \dots - a_kx^n) \quad (2.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial D^2}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x^1 - a_2x^2 - \dots - a_kx^n) \\ \frac{\partial D^2}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a_0 - a_1x^1 - a_2x^2 - \dots - a_kx^n) \\ \frac{\partial D^2}{\partial a_2} = -2 \sum_{i=1}^n x_i^2 (y_i - a_0 - a_1x^1 - a_2x^2 - \dots - a_kx^n) \\ \vdots \\ \frac{\partial D^2}{\partial a_n} = -2 \sum_{i=1}^n x_i^n (y_i - a_0 - a_1x^1 - a_2x^2 - \dots - a_kx^n) \end{array} \right. \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix}
 n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^n \\
 \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{n+1} \\
 \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{n+2} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \sum_{i=1}^n x_i^n & \sum_{i=1}^n x_i^{n+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{n+2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{n+n}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 a_0 \\
 a_1 \\
 a_2 \\
 \vdots \\
 a_n
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sum_{i=1}^n y_i \\
 \sum_{i=1}^n x_i y_i \\
 \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\
 \vdots \\
 \sum_{i=1}^n x_i^n y_i
 \end{bmatrix}
 \quad (2.16)$$

Keterangan:

- $a_0 - a_k$  = Konstanta persamaan  
 $y$  = Variabel dependen atau respon  
 $x$  = Variabel independen atau prediktor

### **BAB III**

#### **KERANGKA KONSEP PENELITIAN**

##### **3.1. Deskripsi Permasalahan**

Seperti yang sudah dijelaskan dalam Bab 1 tentang latar belakang penelitian, bahwa terdapat 2 permasalahan. Yaitu hasil pelapisan yang memiliki warna terbakar dan hasil pelapisan yang tidak merata. Hasil yang memiliki warna terbakar ditunjukkan dalam Gambar 3.1 dan hasil tidak merata terdapat pada Gambar 3.2.



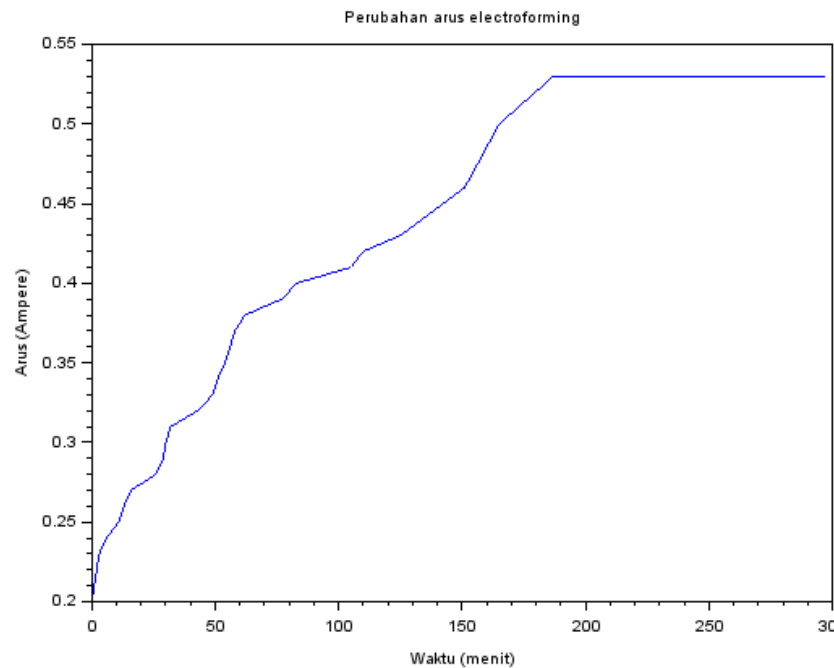
Gambar 3. 1 Hasil pelapisan warna yang terbakar  
(DDee Wilder, 2019, [www.flickr.com](http://www.flickr.com))



Gambar 3. 2 Hasil pelapisan tidak merata

Hasil pelapisan yang memiliki warna terbakar pada Gambar 3.1 adalah akibat nilai arus listrik yang diberikan terlalu besar dan tidak sesuai dengan nilai standar yang diberikan pada penelitian sebelumnya di Tabel 2.3.

Fenomena Gambar 3.2 diakibatkan tidak mengontrol arus, hal ini dapat dilihat dalam grafik di Gambar 3.3. Grafik di Gambar 3.3 menunjukkan bahwa arus listrik yang tidak dikontrol, mengakibatkan nilai arusnya berubah semakin besar. Hasil pengujian pada Gambar 3.3 menggunakan benda kerja dengan dimensi  $3,5\text{cm} \times 2,5\text{cm}$ , memiliki nilai resistansi awal  $14\text{K}\Omega$ , dan menggunakan tegangan konstan  $2,2\text{V}$



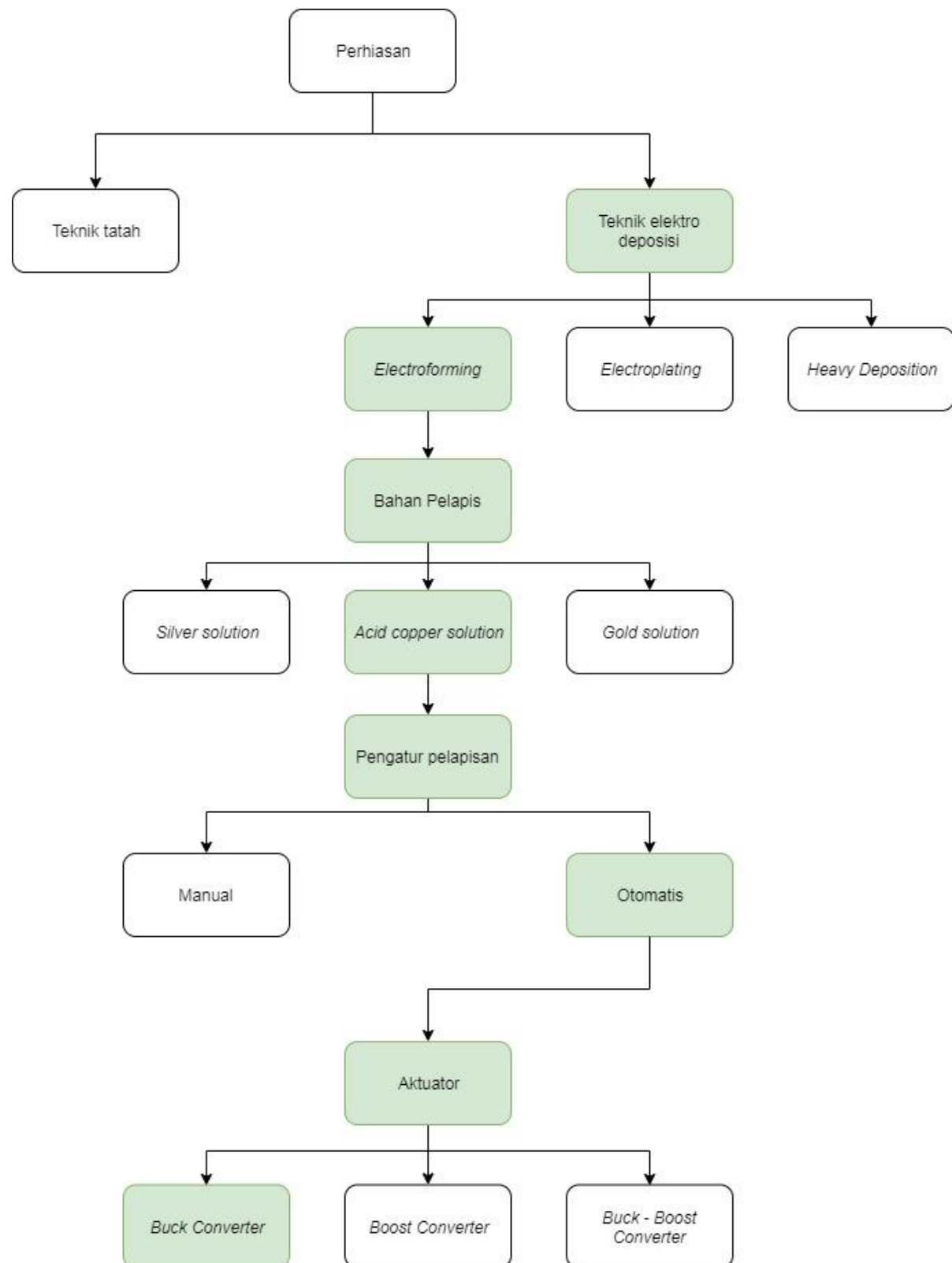
Gambar 3. 3 Hasil pengujian pelapisan electroforming tidak terkontrol

Apabila larutan kimia dan grafit yang digunakan dalam keadaan bagus, maka permasalahannya tersisa adalah bagaimana mengontrol arus listrik agar mendapatkan hasil yang merata dan warna yang tidak terbakar. Maka perlunya merancang bangun catu daya terkontrol guna membantu pengrajin perhiasan Malang mendapatkan hasil produk pelapisan *electroforming* yang baik untuk meningkatkan daya saing dan menambah referensi ilmiah bagi dunia pendidikan.

### 3.2. Kerangka Penelitian

Pembuatan perhiasan memiliki 2 teknik dalam pembuatannya, yaitu tatah atau memahat dan elektro deposisi atau pengendapan menggunakan listrik, dalam penelitian ini metode yang akan digunakan adalah elektro deposisi dengan jenis *electroforming acid copper solution*. Untuk mempertahankan arus yang konstan walaupun resistansi berubah akibat logam yang mengendap di benda kerja, maka dibutuhkan konverter sebagai alat mengubah nilai tegangan dan arus. Dalam Gambar 3.4, dapat dilihat bahwa konverter yang digunakan

adalah *Buck Converter*. Artinya masukan dari *rectifier* merupakan tegangan maksimal dari *plant*.



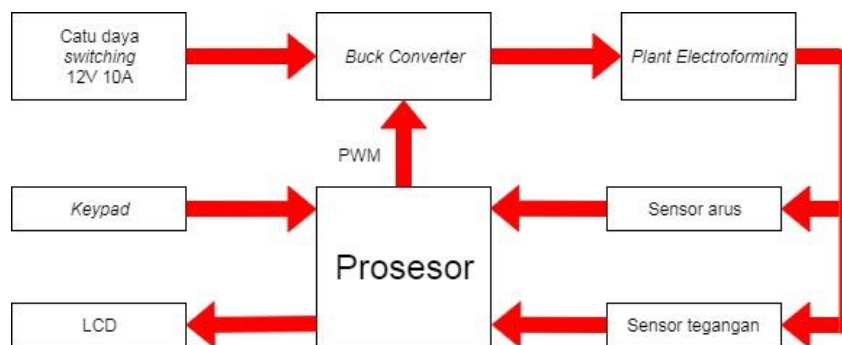
Gambar 3. 4 Kerangka penelitian

### 3.2.1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dari eksperimen dan simulasi, pengumpulan data meliputi karakteristik pelapisan *electroforming*, karakteristik aktuator *buck converter*, karakteristik sensor-sensor dan data hasil simulasi dari pemodelan matematis. Data-data tersebut penting untuk menentukan perangkat keras yang sesuai dengan tujuan awal perancangan catu daya terkontrol.

### 3.2.2. Perancangan Alat

Gambar 3.5 merupakan gambaran secara umum untuk catu daya terkontrol berupa diagram blok. Diagram blok ini dihasilkan dari identifikasi kebutuhan-kebutuhan yang diperlukan. Adapun kebutuhan yang mendukung pembuatan alat ini meliputi:



Gambar 3. 5 Diagram blok perancangan alat

#### 1. Kebutuhan Fungsional

- Alat mampu mengontrol arus sesuai *set point* dengan baik, walaupun nilai resistansinya berubah-ubah.
- Alat dilengkapi *keypad* sebagai masukan *set point* arus yang diinginkan dan masukan waktu yang dibutuhkan untuk pelapisan.
- Alat dilengkapi LCD sebagai tampilan untuk pengukuran arus, waktu dan biaya listrik yang digunakan untuk pelapisan.
- Alat mampu memutuskan dan menyambungkan arus listrik secara otomatis sesuai dengan waktu yang telah ditentukan.

#### 2. Kebutuhan Non-Fungsional

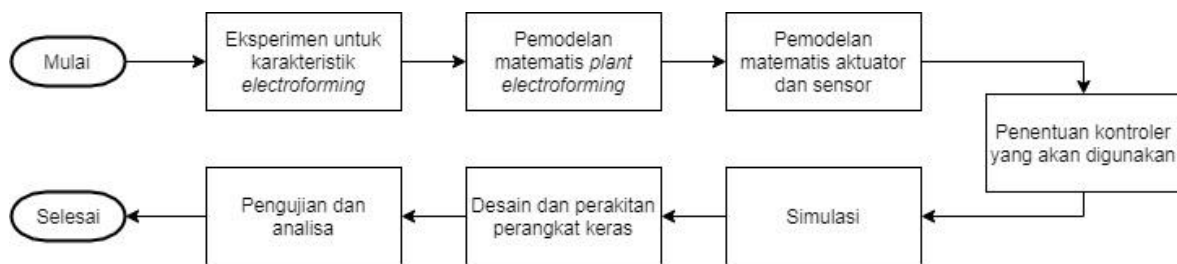
- Desain alat sederhana dan mudah digunakan oleh pengguna.
- Performa alat dapat berjalan dengan baik ketika dioperasikan.

### 3.3. Alur Langkah Penelitian

Secara umum, alur langkah penelitian ditunjukkan dalam diagram blok di Gambar 3.6. Langkah awal penelitian adalah melakukan eksperimen untuk mengetahui karakteristik dari pelapisan *electroforming*, karakteristik yang dicari adalah toleransi *error* pada nilai arus listrik. Selanjutnya melakukan pemodelan matematis untuk menentukan fungsi alih dari



*plant electroforming*, dalam pemodelan ini melibatkan hukum Faraday. Setelah fungsi alih *plant* diketahui, maka yang dilakukan adalah melakukan pemodelan aktuator *buck converter*, sensor arus dan sensor tegangan. Pemodelan-pemodelan ini berguna untuk mempermudah penentuan kontroler apa yang akan digunakan. Apabila kontroler yang akan digunakan adalah kontroler PID, maka *steady state* dan *overshoot* ditentukan dari karakteristik *plant* hasil eksperimen dilangkah awal penelitian. Keluaran dari langkah-langkah di atas adalah fungsi alih keseluruhan dalam domain S, fungsi alih berguna untuk langkah selanjutnya yaitu simulasi.



Gambar 3. 6 Diagram alir langkah-langkah penelitian

Simulasi bertujuan untuk menentukan nilai kapasitor dan induktor pada *buck converter* dan melihat respon dari fungsi alih. Nilai kapasitor dan induktor ditentukan dari ketersediaan komponen-komponen di pasar, artinya nilai kapasitor dan induktor yang berubah akan mengubah respon dari fungsi alih juga. Maka disinilah fungsi lain dari simulasi, yaitu memperbaiki sistem, menyempurnakan desain dan mengurangi pengeluaran dana untuk perancangan. Simulasi dilakukan pada perangkat lunak bernama *Scilab*. Hasil simulasi yang benar adalah ketika kontroler dapat mengontrol arus listrik untuk selalu konstan.

Setelah simulasi selesai, maka dilakukan desain dan perakitan perangkat keras. Desain perangkat keras mengacu pada simulasi, dan dipilih komponen-komponen yang sanggup menahan beban dengan daya 42Watt. Angka 42Watt didapat dari tegangan maksimum 12V dan arus maksimum 3,5A untuk rencana catu daya terkontrol yang akan dibangun. Perangkat lunak berupa program Bahasa C, program dimasukkan kedalam prosesor mikrokontroler. Perangkat lunak ini memiliki fungsi alih kontroler yang telah dirancang dalam pemodelan. Fungsi alih dalam domain frekuensi (s) diubah dulu kedalam domain waktu (t), kemudian dimasukkan ke dalam prosesor. Selanjutnya dilakukan pengujian dan analisis dari fenomena yang akan terjadi dalam langkah terakhir penelitian ini.

### 3.4. Hipotesis

Berdasarkan rumusan masalah dan kerangka konsep penelitian, maka peneliti mengajukan hipotesis sebagai berikut:

1. Karakteristik *electroforming* jenis tembaga asam memiliki respon arus semakin naik saat pelapisan grafit dan arus menjadi konstan saat semua spesimen benda ujicoba tertutup oleh tembaga.
2. Metode numerik dengan orde tertentu bisa digunakan untuk membentuk respon sinyal yang sama dengan karakteristik sinyal arus pada pelapisan *electroforming*.
3. *Buck converter* memiliki *single input* dan *multiple output*, maka untuk memodelkannya dapat menggunakan *state space*. Sedangkan untuk membuat resolusi 10mA, maka dapat memberikan *input Duty cycle* PWM 10 bit.
4. Kontroler yang terbaik adalah kontroler yang dapat menurunkan tegangan untuk mempertahankan arus konstan dengan *settling time* di bawah 1 detik dan tidak boleh ada *overshoot*. Pemilihan kontroler menggunakan simulasi dengan *input* respon step. Setelah pemilihan kontroler terbaik didapatkan, maka seluruh hasil pemodelan matematika perlu disimulasikan secara *real time* menggunakan Xcos Scilab
5. Implentasi perancangan hasil simulasi pada kontroler menggunakan metode numerik, sedangkan sensor menggunakan persamaan hasil kalibrasi menggunakan regresi linier.

## BAB IV

### METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini digunakan metode kuantitatif, dimana penelitian dilakukan dengan eksperimen dan pemodelan matematis. *Flowchart* di Gambar 4.1 menjelaskan bagaimana data-data dikumpulkan. Selain itu, metode ini dipilih karena hasil akhir yang dituju memiliki variabel sedikit. Yaitu hasil pelapisan logam yang merata dan warna yang tidak terbakar, artinya tidak perlu mengumpulkan data secara kualitatif.



Gambar 4. 1 *Flowchart* pengumpulan data

#### 4.1. Karakteristik Plant

Untuk menentukan karakteristik *plant*, dibutuhkan pengumpulan-pengumpulan data menggunakan serangkaian percobaan. Data yang dibutuhkan adalah nilai maksimum arus listrik yang ditoleransi, dan perubahan nilai arus listrik terhadap waktu. Uji coba dilakukan pada benda kerja yang ditunjukkan dalam Gambar 4.2, benda kerja ini memiliki dimensi  $3,5\text{cm} \times 2,5\text{cm}$  dengan nilai awal resistansi  $14\text{K}\Omega$ . Uji coba dilakukan pada cairan kimia untuk pelapisan tembaga dengan komposisi dan standar seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.1. Variabel tambahan yang perlu dipenuhi dalam cairan kimia ini adalah besarnya nilai berat jenis cairan sebesar  $22\text{Baume}$  dan tingkat keasaman cairan sebesar  $1\text{pH}$ .



Gambar 4. 2 Benda kerja untuk penentuan karakteristik *plant*

Dimensi bejana yang digunakan adalah lebar  $13,5\text{cm}$ , panjang  $20,5\text{cm}$  dan kedalaman  $13\text{cm}$ . Peletakan bahan pelapis dan benda kerja ditunjukkan oleh Gambar 4.3, prosedur percobaan untuk mendapatkan data yang telah ditentukan yaitu:

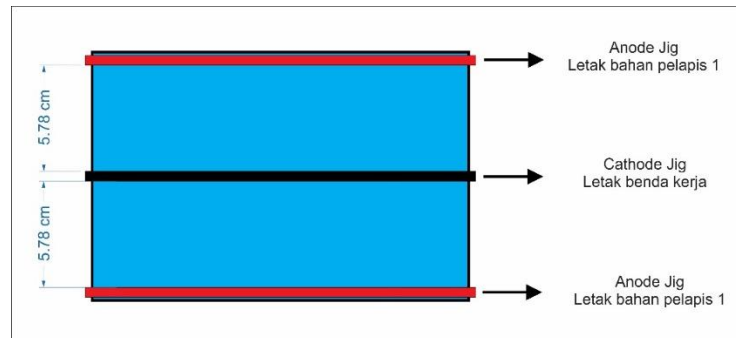
1. Memberikan nilai tegangan konstan hingga mendapatkan nilai arus listrik yang ditoleransi, indikasi nilai arus listrik maksimum yang ditoleransi didapatkan apabila benda kerja yang dilapisi menghasilkan lapisan tembaga yang kasar dan terjadi penumpukan tembaga pada tiap ujung tepi benda kerja.
2. Mencatat tiap perubahan nilai arus listrik saat percobaan dalam satuan menit.

#### 4.2. Pemodelan Matematis dan Simulasi

##### 4.2.1. Pemodelan matematis plant

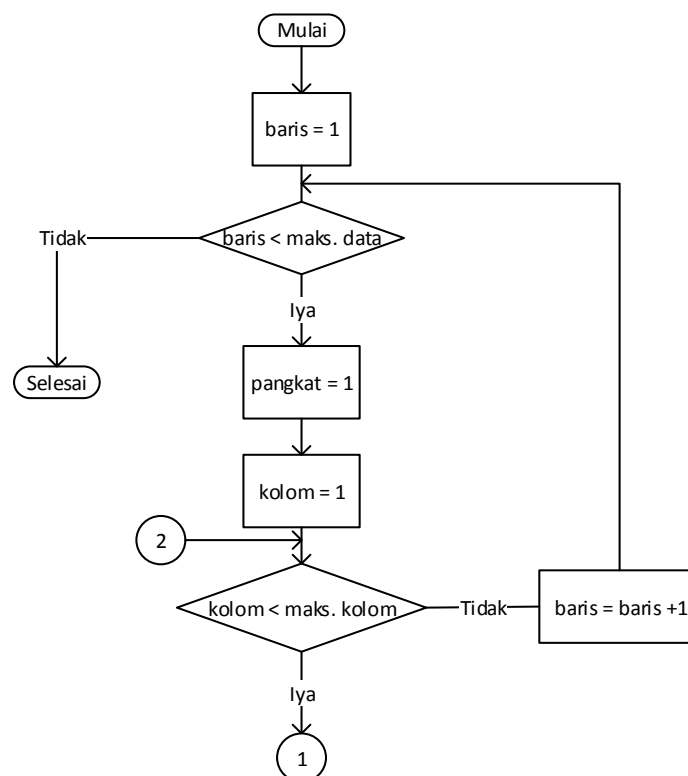
Data-data karakteristik *plant* yang telah ditemukan dapat diubah menjadi pemodelan matematis menggunakan metode numerik regresi polinomial, besarnya orde yang digunakan

untuk melakukan pendekatan adalah orde 10. Pemrograman komputer Scilab digunakan untuk mempercepat pencarian persamaan dan mengurangi kesalahan perhitungan.

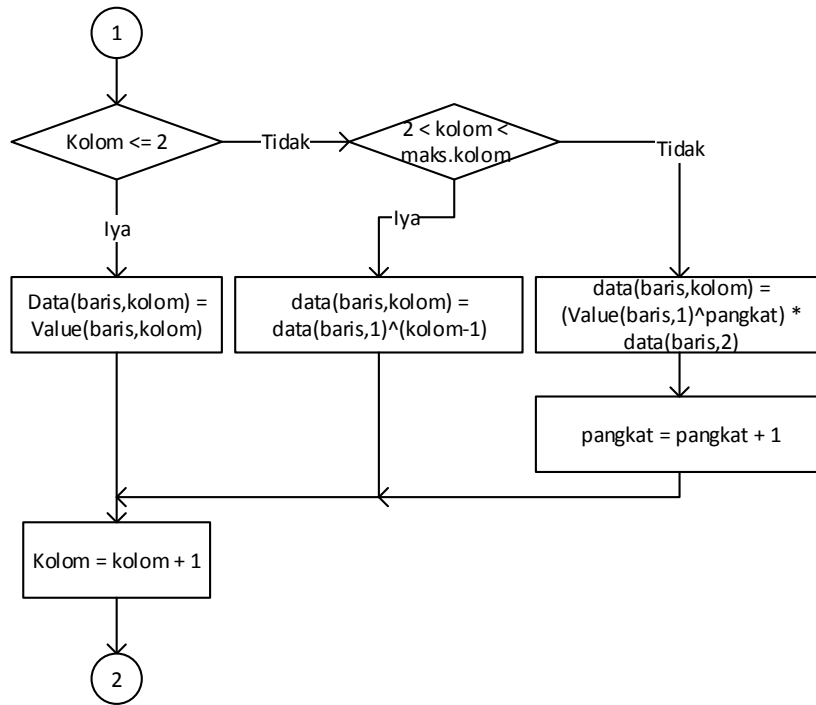


Gambar 4. 3 Dimensi bejana untuk cairan kimia

Variabel  $x$  adalah nilai data karakteristik waktu plant dalam detik, dan variabel  $y$  adalah data karakteristik perubahan arus plant dalam satuan Ampere. Variabel  $x$  dan  $y$  dioperasikan ke dalam matriks seperti Persaman 2.16 menggunakan array dalam variabel data. Variabel data kolom 1 adalah variabel  $x$  dan variabel data kolom 2 adalah variabel  $y$ . Pembentukan array ini menggunakan logika pemrograman *looping for* dan alur dapat dilihat dalam Gambar 4.4 dan Gambar 4.5. Seluruh data array hasil pemrograman Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 ini dijumlahkan dan dibentuk array baru bernama  $K1$  dan  $K2$ . Sehingga konstanta  $Ka$  persamaan bisa didapatkan menggunakan perintah `inv(K1) * K2`.



Gambar 4. 4 Diagram alir program regresi polinomial bagian 1



Gambar 4. 5 Diagram alir program regresi polinomial bagian 2

#### 4.2.2. Pemodelan matematis aktuator

Menggunakan rangkaian setara pada Gambar 2.7, kita dapat memodelkan matematis ke dalam *state space*. Dalam keadaan MOSFET aktif, *state space* yang digunakan adalah Persamaan 4.2 dan Persamaan 4.4. Persamaan 4.2 merupakan pejabaran dari persamaan matriks di Persamaan 4.1, dan Persamaan 4.4 merupakan representasi dari Persamaan 4.3.

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 u \quad (4.1)$$

Jika

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad u = V_s$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{Cap} & -\frac{1}{Cap R} \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Maka

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{Cap} & -\frac{1}{Cap R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_s \quad (4.2)$$

$$y = C_1 x + D_1 u \quad (4.3)$$

Dengan

$$y = \begin{bmatrix} i_R \\ v_R \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad u = V_s$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad D_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Sehingga

$$\begin{bmatrix} i_R \\ v_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_s \quad (4.4)$$

Saat keadaan MOSFET tidak aktif, matriks  $A_2$  sama dengan matriks  $A_1$  dan matriks  $C_2$  sama dengan matriks  $C_1$ . Perbedaannya hanya pada matriks  $B_2$  yang bernilai 0. Maka state space rata-rata dijabarkan oleh Persamaan 4.5 dan Persamaan 4.6 menghasilkan *State Space* masukan pada Persamaan 4.7. Serta *State Space* rata rata keluaran menggunakan Persamaan 4.10 yang merupakan hasil dari penjabaran Persamaan 4.8 dan Persamaan 4.9. Variabel  $D_c$  merupakan nilai *duty cycle*, dan frekuensi PWM yang digunakan adalah 1 Hz.

$$\dot{x} = [A_1 x D_c + A_2 x (1 - D_c)] + [B_1 u D_c + B_2 u (1 - D_c)] \quad (4.5)$$

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 u D_c \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{Cap} & -\frac{1}{Cap R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_s}{L} \\ 0 \end{bmatrix} D_c \quad (4.7)$$

$$y = [C_1 x D_c + C_2 x (1 - D_c)] \quad (4.8)$$

$$y = C_1 x \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} i_R \\ v_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

#### 4.2.3. Pemodelan matematis kontroler

Pemodelan kontroler PID ditunjukkan dalam Persamaan 4.11, nilai waktu integral ( $T_i$ ) diatur 30 ms dan nilai waktu diferensial ( $T_d$ ) diatur 30ms. Sehingga untuk mendapatkan nilai

konstanta proporsional ( $K_p$ ), dilakukan *tunning* menggunakan metode *root locus* dalam fungsi frekuensi ( $s$ ). Artinya seluruh persamaan hasil pemodelan *plant*, dan aktuator dikonversi menjadi fungsi frekuensi ( $s$ ). Persamaan 4.12 merupakan bentuk fungsi frekuensi ( $s$ ) dari Persamaan 4.11.

$$PID(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.11)$$

$$PID(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.12)$$

Persamaan *state space* kontroler dapat dikonversikan ke dalam fungsi frekuensi ( $s$ ) menggunakan Persamaan 4.13. Matriks  $A$  hasil pemodelan kontroler sebelumnya, dikurangi matriks identitas ( $I$ ) dikalikan  $s$ . Matriks identitas memiliki dimensi yang sama dengan dimensi matriks  $A$ , selanjutnya hasil operasi ini dibalik menggunakan operasi *invers*. Hasil persamaan 4.13 akan memiliki 2 persamaan, persamaan pertama mewakili fenomena arus beban ( $i_R$ ) dan persamaan kedua mewakili fenomena tegangan beban ( $v_R$ ).

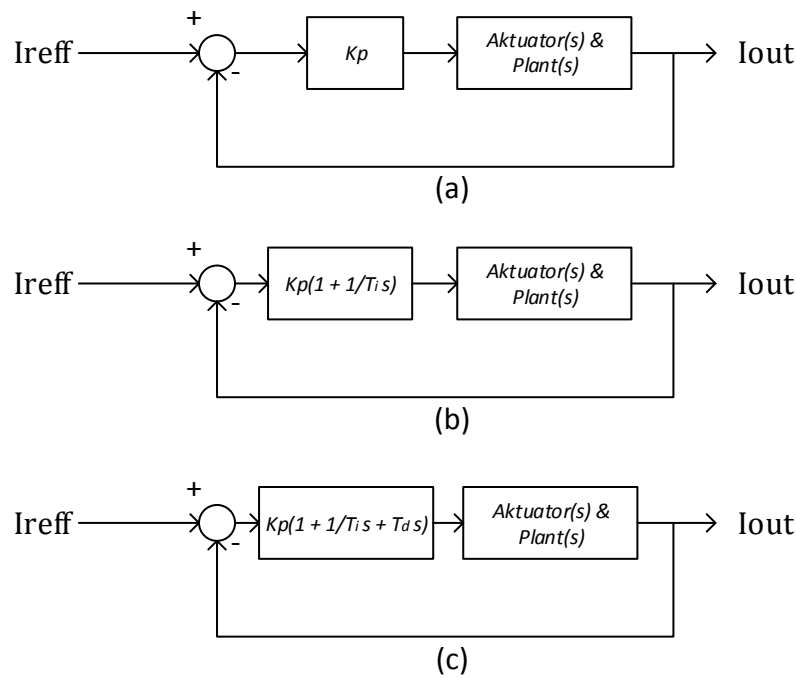
$$aktuator(s) = C(sI - A)^{-1} B + D \quad (4.13)$$

*Tunning* kontroler dikontrol  $P$ ,  $PI$ , dan  $PID$  dilakukan secara terpisah dan bergantian menggunakan metode *root locus*. Persamaan tiap pemodelan perlu dioperasikan untuk menghasilkan fungsi alih yang akan digunakan untuk *tunning* menggunakan metode *root locus*. Operasi ini mengacu pada diagram blok pada Gambar 4.6, dimana Gambar 4.6(a) untuk kontrol  $P$ , Gambar 4.6(b) untuk kontrol  $PI$ , dan Gambar 4.6(c) adalah kontrol  $PID$ . Setelah didapatkan nilai  $K_p$ , maka kita dapat menentukan nilai konstanta  $K_i$ , dan  $K_d$  menggunakan Persamaan 4.14 dan Persamaan 4.15.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (4.14)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (4.15)$$





Gambar 4. 6 Diagram blok untuk mencari nilai  $K_p$  menggunakan *root locus*

Sebuah sistem dianggap stabil apabila garis akar-akar nyata dan imajineranya berada di area negatif dari grafik *root locus*, terdapat banyak pilihan akar-akar yang mewakili fungsi alih dengan nilai  $K_p$  tertentu. Sehingga untuk menentukan nilai  $K_p$  mana yang terbaik, maka dapat dianalisis menggunakan karakteristik dari sinyal transien. Tentu karakteristiknya harus mendekati karakteristik *plant* yang akan ditentukan nantinya. Karakteristik yang perlu diperhatikan adalah *Delay Time*, *Rise Time*, *Peak Time*, *Maximum Overshoot* dan *Settling Time*. Karakteristik tersebut dapat diketahui menggunakan Persamaan 4.16 hingga Persamaan 4.21. Persamaan *Settling Time* yang digunakan adalah persamaan yang umum digunakan, yaitu sebesar 2%.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.16)$$

$$\sigma = \xi \omega_n \quad (4.17)$$

$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \left( \frac{\omega_d}{\sigma} \right) \quad (4.18)$$

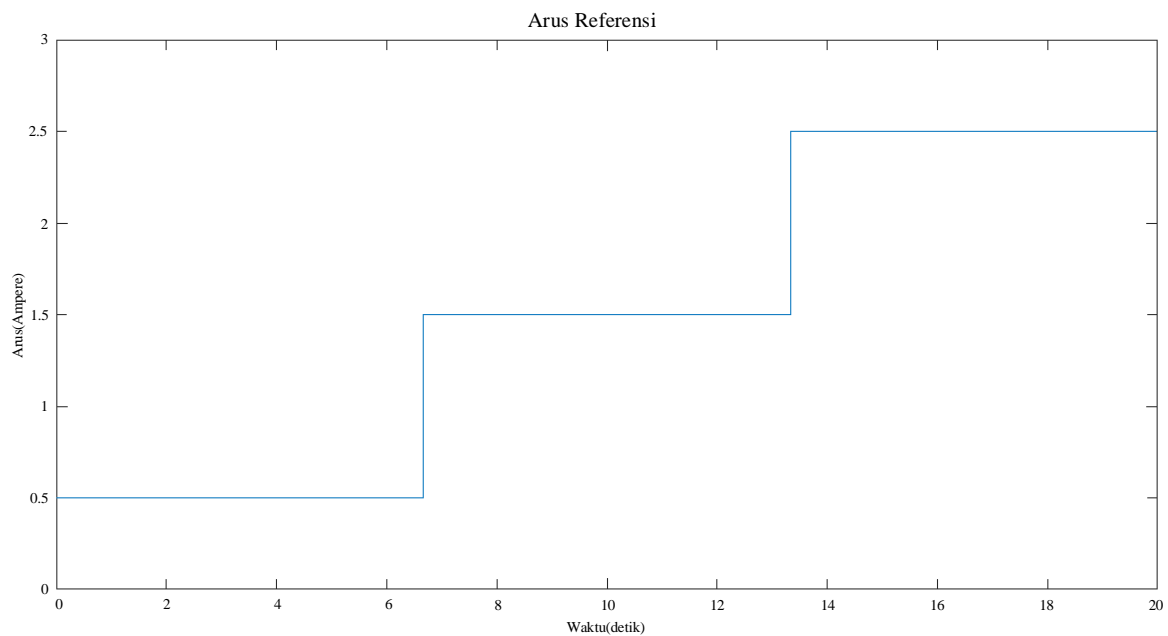
$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (4.19)$$

$$M_p = e^{-\left(\frac{\sigma}{\omega_d}\right)\pi} \quad (4.20)$$

$$t_s = 4T = \frac{4}{\sigma} \quad (4.21)$$

#### 4.2.4. Simulasi

Setiap kontroler diuji dan dicari mana yang terbaik dari ketiga kontroler tersebut menggunakan sinyal masukan unit *step*, pengujian ini menggunakan *Scilab Notes*. Setelah mendapatkan kontroler mana yang terbaik untuk sistem *electroforming* ini, maka keseluruhan sistem dapat disimulasikan dalam domain waktu menggunakan *Scilab Xcos*. Dalam simulasi di *Scilab Xcos* diberikan masukan sinyal seperti Gambar 4.7, dan bentuk blok dalam *Scilab Xcos* digambarkan dalam Gambar 4.8.



Gambar 4. 7 Arus referensi untuk pengujian sistem simulasi



Keterangan:

$I_{10bit}$  = Arus listrik ADC internal 10 bit (A)

$I_{16bit}$  = Arus listrik ADC eksternal ADS1115 (A)

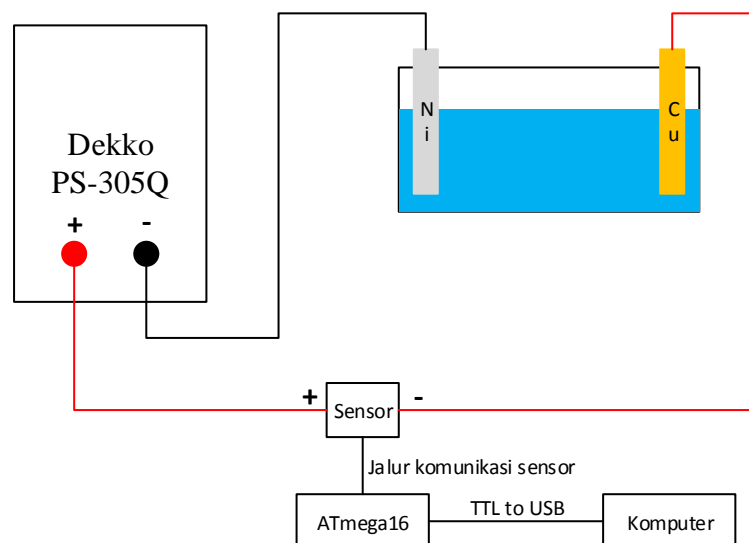
$I_{INA}$  = Arus listrik menggunakan INA219 (A)

ADC = Nilai konversi dari analog ke digital

$sens$  = Sensitivitas ACS758 (40mV/A)

Tiap sensor mengambil data arus sebanyak 100 kali dengan nilai yang diuji 0,00A; 0,05A; 0,55A; 1,00A; 1,55A; 2,00A; 2,55A; 3,00A. Kemudian tiap nilai tersebut di rata-ratakan untuk dilakukan regresi linier, hasil regresi linier adalah faktor kalibrasi. Faktor kalibrasi digunakan kembali dengan metode yang sama. Kemudian dilihat galat masing-masing sensor, hasil akhirnya adalah sensor yang akan digunakan dan tentunya memiliki kemampuan seperti yang dijelaskan dalam paragraf sebelumnya.

Instalasi pengujian dapat dilihat dalam Gambar 4.8, benda kerja yang digunakan adalah nikel dengan dimensi panjang dan lebar 5cm serta tebal 1cm. Alat ukur pembanding menggunakan *Power Supply Switching Dekko PS-305Q*, alat ukur pembanding ini sekaligus menjadi sumber arus untuk pengujian ini.

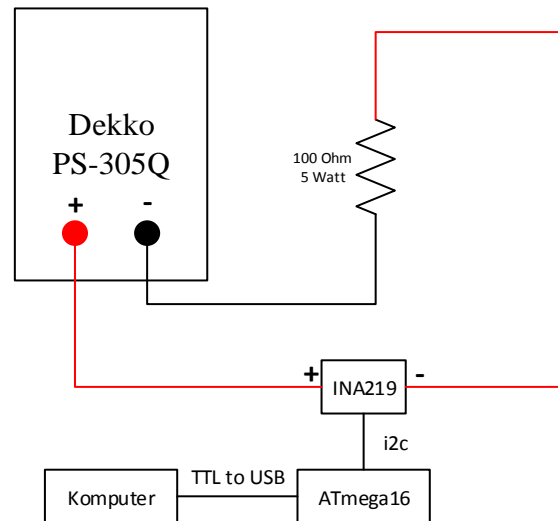


Gambar 4. 9 Rangkaian pengujian sensor arus

#### 4.3.2. Sensor tegangan

Pengujian sensor tegangan menggunakan INA219, di dalam sensor ini terdapat 2 jenis pengukuran. 2 Jenis pengukuran itu adalah tegangan BUS dan tegangan SHUNT. Sensor tegangan mengambil data sebanyak 100 kali dengan nilai tegangan masing-masing 0V hingga 20V, jarak antar data adalah 0,5V. Setelah semua data dikumpulkan, data dirata-

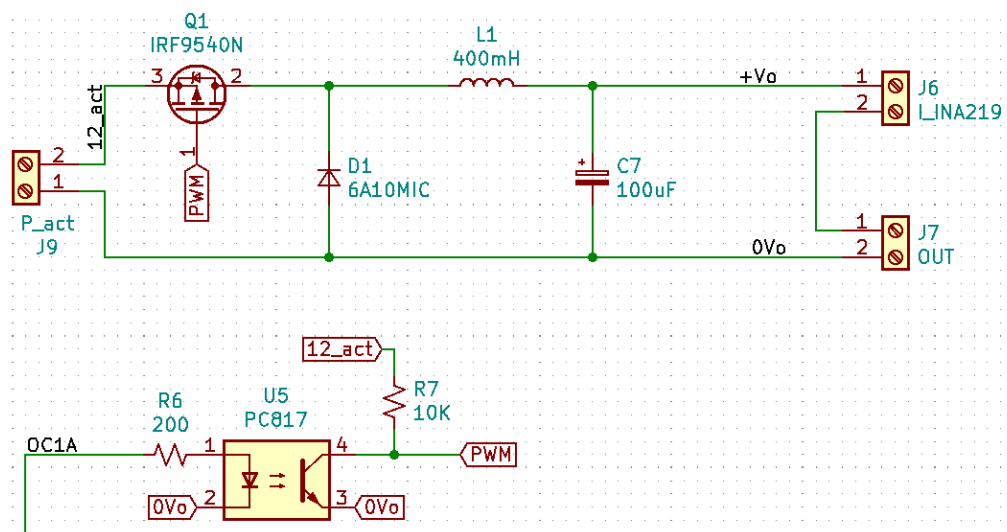
ratakan, lalu dilakukan kalibrasi untuk mencari nilai faktor kalibrasi. Data diambil kembali menggunakan faktor kalibrasi tersebut, dilihat nilai yang mendekati dengan alat ukur pembanding atau yang memiliki galat terkecil. Instalasi pengujian menggunakan resistor  $100\Omega$  5Watt dan Power Supply Switching Dekko PS-305Q sebagai alat ukur pembanding sekaligus sumber tegangan bagi pengujian ini. Instalasi ini dapat dilihat di Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Rangkaian pengujian sensor tegangan

### 4.3.3. Aktuator

*Buck Converter* menggunakan MOSFET tipe P IRF9540N, kaki *gate* MOSFET ini terhubung dengan mikrokontroler (AT-MEGA16) menggunakan *optocoupler* PC817. Hal ini dilakukan agar *gate* bisa mendapatkan tegangan sebesar 12V. Dioda yang digunakan adalah 6A10MIC, dioda ini mampu mengalirkan arus hingga 6A dan tegangan 1000V. Rangkaian *buck converter* dapat dilihat dalam Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Rangkaian aktuator dan sensor

#### 4.3.4. Program mikrokontroler

Mikrokontroler ATMEGA 16 menggunakan Bahasa C untuk mengoperasikannya, ada beberapa menu yang harus ditampilkan oleh ATMEGA 16. Menu-menu itu yaitu:

- Konstan Tegangan. Mode ini akan menampilkan tegangan keluaran, tegangan referensi dan arus keluaran, mikrokontroler akan mempertahankan tegangan keluaran sesuai dengan nilai tegangan referensi yang akan dimasukkan.
- Konstan Arus. Mode konstan arus menampilkan tegangan keluaran, arus referensi dan arus keluaran, mode ini mikrokontroler akan mengontrol arus keluaran sesuai dengan nilai referensi arus yang diberikan oleh operator.

- Otomatis

Mode ini merupakan mode yang paling mudah digunakan, karena operator hanya memasukkan sisi benda sesuai dengan bentuknya, dan memberikan ketebalan yang diinginkan. Maka mikrokontroler akan mengontrol arus sesuai dengan luas permukaan, luas permukaan sudah bisa didapatkan secara otomatis manakala operator memberikan dimensi sisi dan bentuknya. Selain itu mode ini juga dapat menghentikan pengoperasian ketika ketebalan sudah tercapai, penghentian operasi pelapisan mengacu pada waktu yang telah ditunjukkan dalam penelitian sebelumnya di Tabel 2.2.

Pengukuran dilakukan tiap 30ms menggunakan fasilitas *interrupt 0 overflow*. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan waktu pengukuran yang konstan. Pemilihan waktu 30ms merupakan angka aman setelah waktu tunda akibat lamanya pengukuran dan konversi yang dilakukan oleh mikrokontroler. Tampilan di LCD ditampilkan setiap 200ms, sedangkan *input keypad* menggunakan fasilitas *external interrupt*. Hasil pengukuran langsung di proses secara *real time* oleh kontroler.

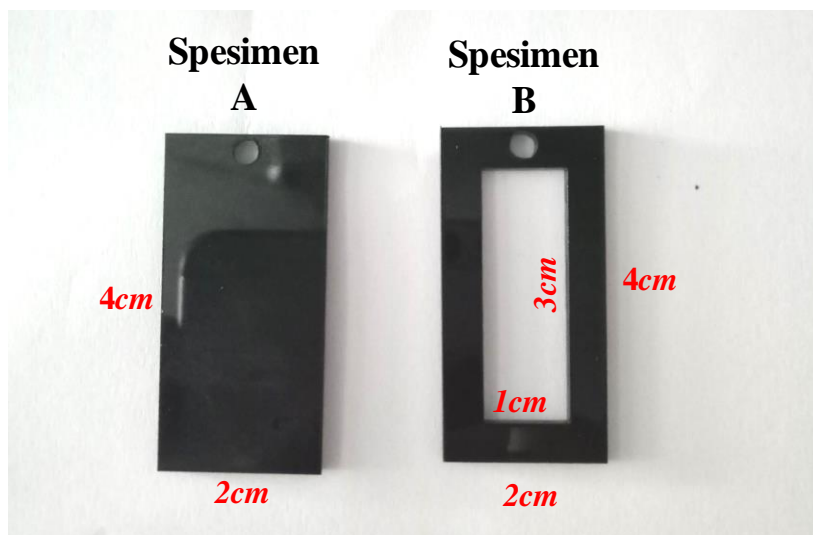
Jenis kontroler integral menggunakan metode numerik Trapezoidal, persamaan ditunjukkan dalam Persamaan 4.25. Sedangkan kontroler diferensial menggunakan metode numerik Euler seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 4.26. Persamaan kontroler ini dimasukkan dalam prosedur *Interrupt ISR timer overflow*.

$$I = (t_1 - t_0) \times \left( \frac{I_1 - I_0}{2} \right) \quad (4.25)$$

$$y_{i+1} = K_d(y_i + y' \Delta t) \quad (4.26)$$

#### 4.4. Pengujian Sistem Perangkat

Pengujian dilakukan pada 2 jenis spesimen, yaitu spesimen A dan spesimen B seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12. Spesimen A memiliki dimensi  $2\text{cm} \times 4\text{cm}$  dengan tebal  $2\text{mm}$ . Spesimen B memiliki dimensi yang sama namun bagian tengahnya memiliki dimensi kosong  $1\text{cm} \times 3\text{cm}$ . Tiap spesimen diukur masa sebelum diberi grafit, setelah diberi grafit dan setelah pelapisan. Dalam pelapisan tiap jenis spesimen, dibedakan menjadi 2 jenis uji coba. Uji coba pertama pelapisan tunggal dengan variasi lama pelapisan 1 jam, 2 jam dan 3 jam secara bergantian dengan specimen yang berbeda. Ujicoba kedua pelapisan paralel sebanyak 3 buah dengan variasi lama pelapisan seperti uji coba pertama. Hasil pengukuran masa setelah pelapisan akan digunakan untuk menentukan tebal pelapisan menggunakan Persamaan 4.27 dan Persamaan 4.28.



Gambar 4. 12 Jenis spesimen untuk uji coba

$$Vol_{Cu} = \frac{m_a - m_g}{\rho} \quad (4.27)$$

$$thick_{Cu} = \frac{Vol_{Cu}}{A_{total}} \quad (4.28)$$

Keterangan:

$Vol_{Cu}$  = Volume Tembaga ( $\text{cm}^3$ )

$m_a$  = Massa akhir setelah pelapisan ( $\text{gram}$ )

$m_g$  = Massa awal sebelum pelapisan ( $\text{gram}$ )

$A_{total}$  = Luas permukaan ( $\text{cm}^2$ )

$thick_{Cu}$  = Tebal Tembaga ( $\mu\text{m}$ )

$\rho$  = Massa jenis tembaga ( $\frac{\text{gram}}{\text{cm}^3}$ ) =  $8,9 \frac{\text{gram}}{\text{cm}^3}$





## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 5.1. Karakteristik dan pemodelan matematis plant

Gambar 5.1 memiliki dimensi  $3,5\text{cm} \times 2,5\text{cm}$ , jika menggunakan standart Tabel 2.2 maka arus referensi awal yang digunakan adalah seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 5.1. Arus ini ditambah terus menerus hingga mendapatkan hasil yang rusak seperti pada Gambar 5.1. Besarnya selisih tiap pertambahan adalah  $0,1A$ , dan tiap perubahan arus tersebut diamati selama 100 menit. Pemilihan waktu pengamatan ini ditentukan dari kecepatan pelapisan maksimum, yaitu  $66,65\mu\text{m}/h$ . Selain itu pemilihan lamanya pengamatan berdasarkan kemampuan mata yang hanya dapat melihat benda terkecil sebesar  $0,1\text{mm}$  atau  $100\mu\text{m}$ . Hasil uji coba ternyata besar arus  $0,53A$  menyebabkan hasil seperti Gambar 5.1, maka besarnya persentase galat yang ditoleransi ditunjukkan dalam persamaan 5.2.

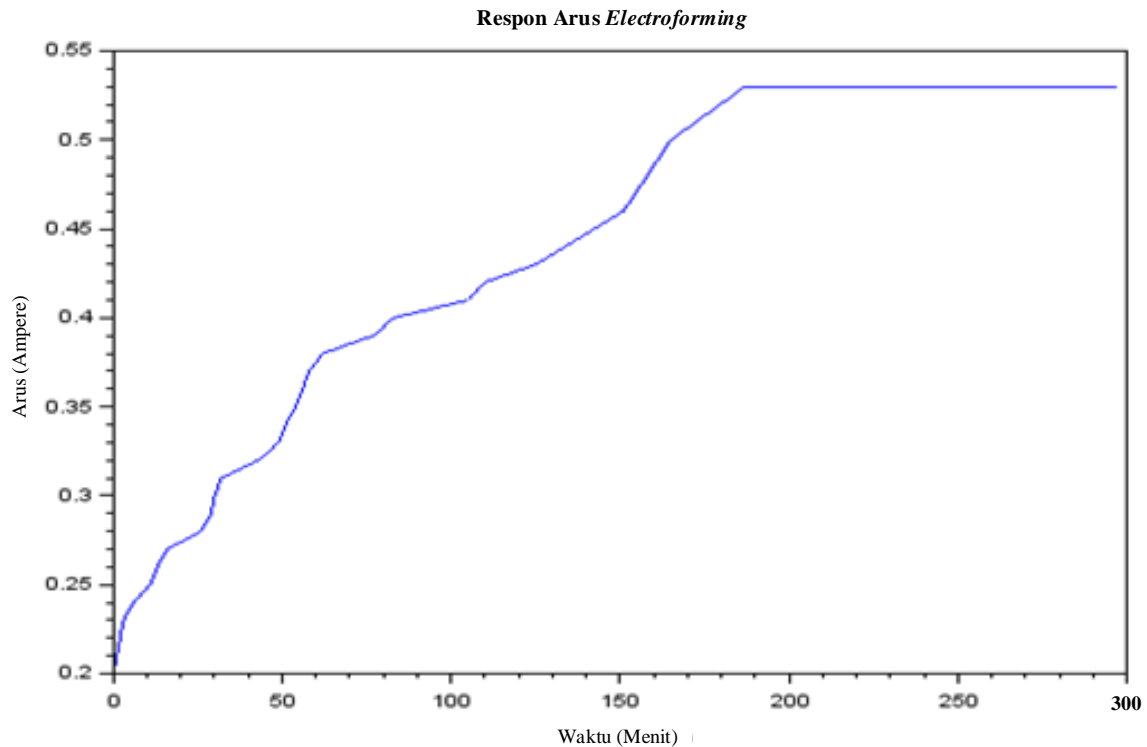


Gambar 5. 1 Hasil uji coba karakteristik plant

$$I_{ref} = \frac{A_{total} \times 2 \times 0,5}{100} = \frac{8,75 \times 2 \times 0,5}{100} = 0,08A \quad (5.1)$$

$$\%galat = (I_{galat} - I_{ref}) \times 100 = (0,58 - 0,08) \times 100 = 50\% \quad (5.2)$$

Uji coba dilakukan kembali menggunakan benda kerja baru dengan dimensi yang sama dengan Gambar 5.1. Tegangan konstan yang diberikan adalah 2.2V dan yang didata adalah fenomena perubahan arus terhadap waktu. Hasilnya dapat dilihat dalam Gambar 5.2, ternyata arus akan konstan saat menit ke 185. Saat diamati menit ke 185 ini keadaan benda kerja sudah terlapisi, walaupun lapisannya tidak merata dan memiliki lapisan berpartikel besar-besar serta bertumpuk.

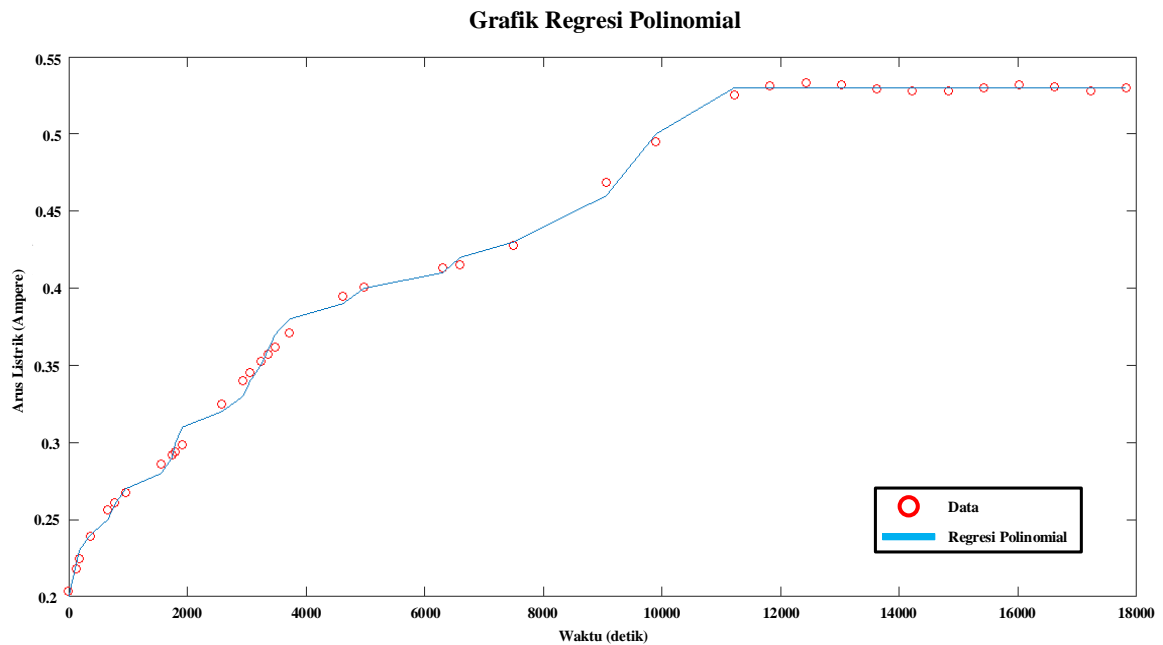


Gambar 5. 2 Respon arus pada *plant*

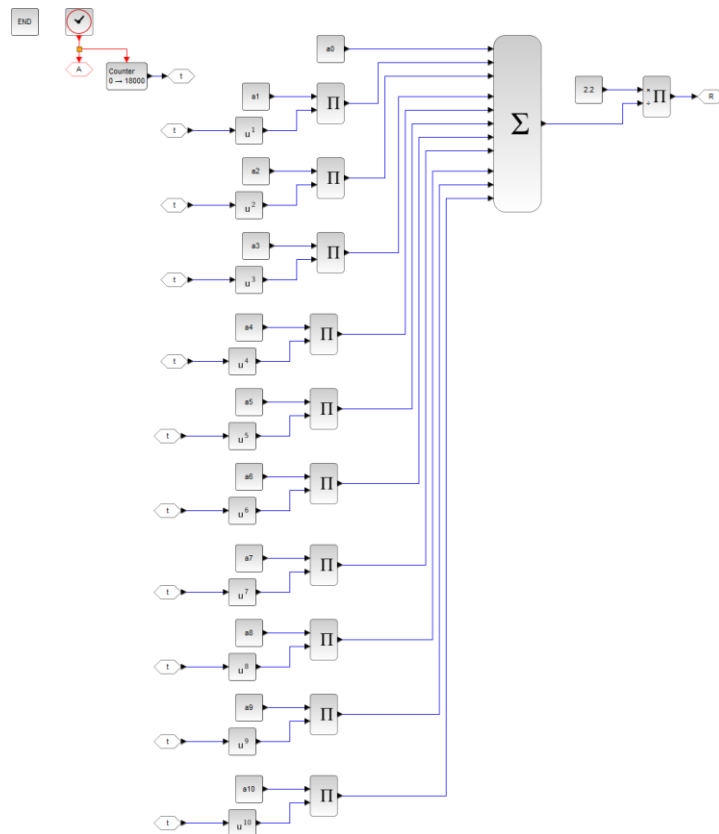
Hasil regresi polinomial menggunakan algoritma program pada Lampiran 1, didapatkan bahwa dengan konstanta  $a_0$  hingga  $a_{10}$  sudah dapat melakukan pendekatan seperti bentuk sinyal *plant*, hal ini dapat dilihat di Gambar 5.3. Konstanta  $a_0$  hingga  $a_{10}$  dapat dilihat di Persamaan 5.3, hasil ini didapat dari invers matriks dalam Lampiran 2 dan matriks Persamaan 5.4. Sedangkan untuk mengubah kedalam program Xcos, bentuk diagramnya dapat dilihat dalam Gambar 5.4.

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \\ a_9 \\ a_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2038845091155963 \\ 1,3325461753765921 \times 10^4 \\ -1,1639941166485812 \times 10^7 \\ 6,368637897862656 \times 10^{11} \\ -1,8143128781046163 \times 10^{14} \\ 2,9038422588505522 \times 10^{18} \\ -2,7288300966979393 \times 10^{22} \\ 1,5056912794092627 \times 10^{26} \\ -4,601807005661936 \times 10^{31} \\ 6,4970385836948 \times 10^{36} \\ -2,0318886576297705 \times 10^{41} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$\begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i^3 y_i \\ \sum x_i^4 y_i \\ \sum x_i^5 y_i \\ \sum x_i^6 y_i \\ \sum x_i^7 y_i \\ \sum x_i^8 y_i \\ \sum x_i^9 y_i \\ \sum x_i^{10} y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14,669999999999991 \\ 124577,40000000002 \\ 1,561805028 \times 10^9 \\ 2,206920171672 \times 10^9 \\ 3,288431387239056 \times 10^9 \\ 5,053350984229522 \times 10^9 \\ 7,933020065618545 \times 10^9 \\ 1,2657566599346368 \times 10^9 \\ 2,0459824032937555 \times 10^9 \\ 3,342661108010889 \times 10^9 \\ 5,510188227186342 \times 10^9 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$



Gambar 5. 3 Hasil pendekatan polinomial orde 10



Gambar 5. 4 Diagram blok state *space plant* pada Xcos Scilab

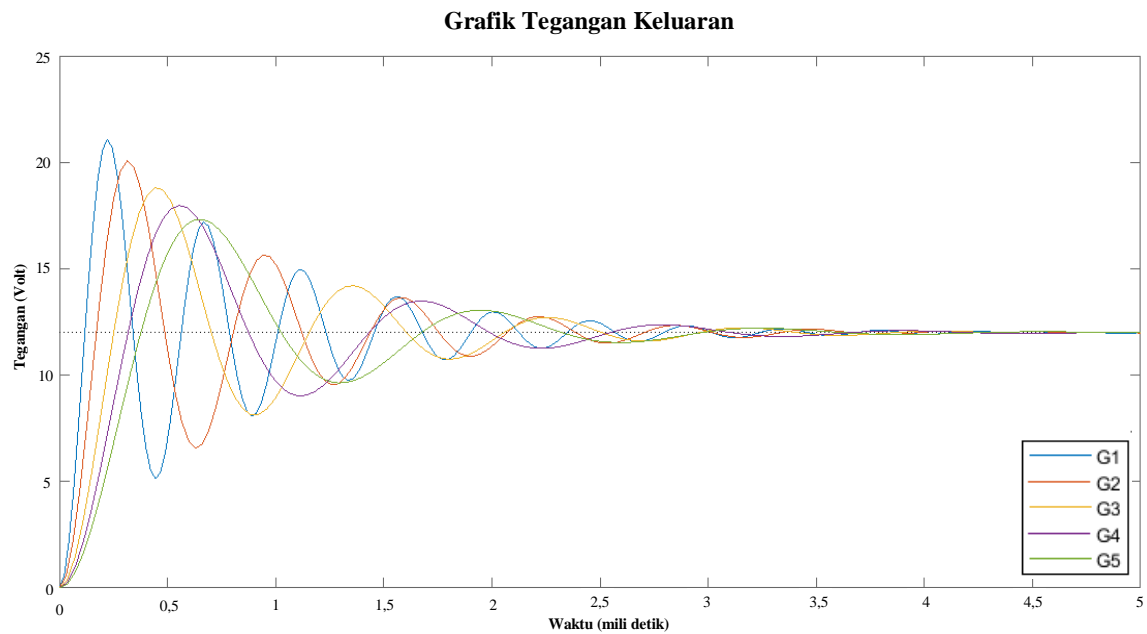
Pemilihan orde 10 ini adalah opsi terbaik. Alasannya karena jika menggunakan pendekatan orde lebih besar dari 10, hasilnya sangat mendekati saat respon arus asli naik. Namun saat respon arus asli konstan, pendekatan justru memiliki kesalahan. Yaitu respon pendekatan metode numeriknya semakin naik bukan ikut konstan. Berbeda jika pemilihan pendekatan metode numeriknya di bawah orde 10, hasil respon tidak mendekati respon arus asli. Karena pendekatan di bawah orde 10 nyaris membentuk garis lurus.

## 5.2. Karakteristik dan pemodelan matematis aktuator

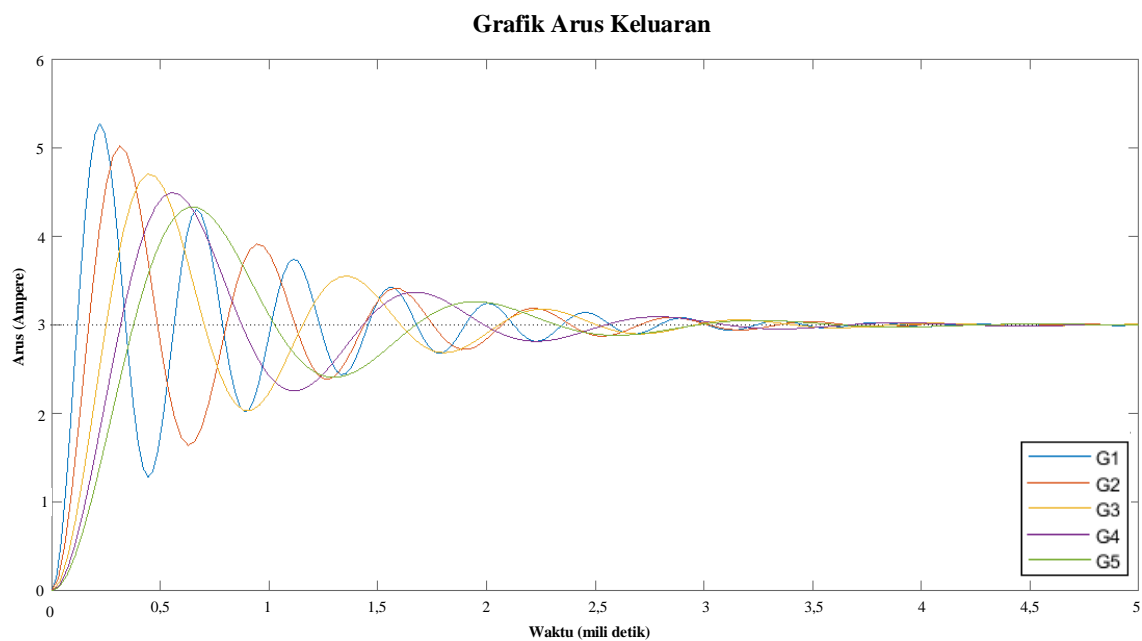
Hasil pemodelan menunjukkan bahwa nilai induktor lebih kecil dari nilai kapasitor akan menyebabkan waktu naik dalam respon tegangan keluaran semakin cepat, dan apabila sebaliknya maka akan semakin lambat waktu naik dalam tegangan keluaran. Hal ini bisa dilihat dalam Gambar 5.5 dan Gambar 5.6, aktuator diuji menggunakan respon step.

Respon G1 dalam Gambar 5.5 memiliki nilai induktor  $50mH$  dan nilai kapasitor  $100\mu F$ , respon G1 memiliki waktu puncak  $0,221ms$  dan persentase *overshoot*  $75,66\%$ . Respon G2 menggunakan nilai induktor  $100mH$  dan nilai kapasitor  $100\mu F$ , hasilnya keluarannya memiliki waktu puncak  $0,3141ms$  dan nilai *overshoot*  $67,29\%$ . Respon G3 menggunakan nilai induktor  $200mH$ , menghasilkan keluaran dengan waktu puncak  $0,4421ms$  dan

persentase overshoot 56,754%. Sedangkan G4 dengan nilai induktor  $300mH$  menghasilkan keluaran dengan nilai waktu puncak  $0,526ms$  dan persentase *overshoot* 49,80%. G5 memiliki nilai induktor  $400mH$ , menghasilkan keluaran dengan waktu naik  $0,6631ms$  serta nilai *overshoot* sebesar 44,32%. G3 hingga G5 menggunakan nilai kapasitor yang sama seperti G1 dan G2, yaitu  $100\mu F$ . Antara respon tegangan keluaran dan arus keluaran memiliki karakteristik yang sama walaupun berbeda fungsinya.



Gambar 5. 5 Karakteristik tegangan keluaran aktuator



Gambar 5. 6 Karakteristik arus keluaran aktuator

Respon yang digunakan adalah G5, karena respon ini mewakili keadaan perangkat keras yang digunakan. Pengujian step ini menggunakan Scilab dengan frekuensi masukan  $1Hz$  dan program yang digunakan di Lampiran 3. Program ini menghasilkan fungsi alih dalam fungsi frekuensi (s) seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 5.5 untuk respon tegangan dan Persamaan 5.6 untuk respon arus.

$$V_{act}(s) = \frac{75 \times 10^6}{s^2 + 2500s + 25 \times 10^6} \quad (5.5)$$

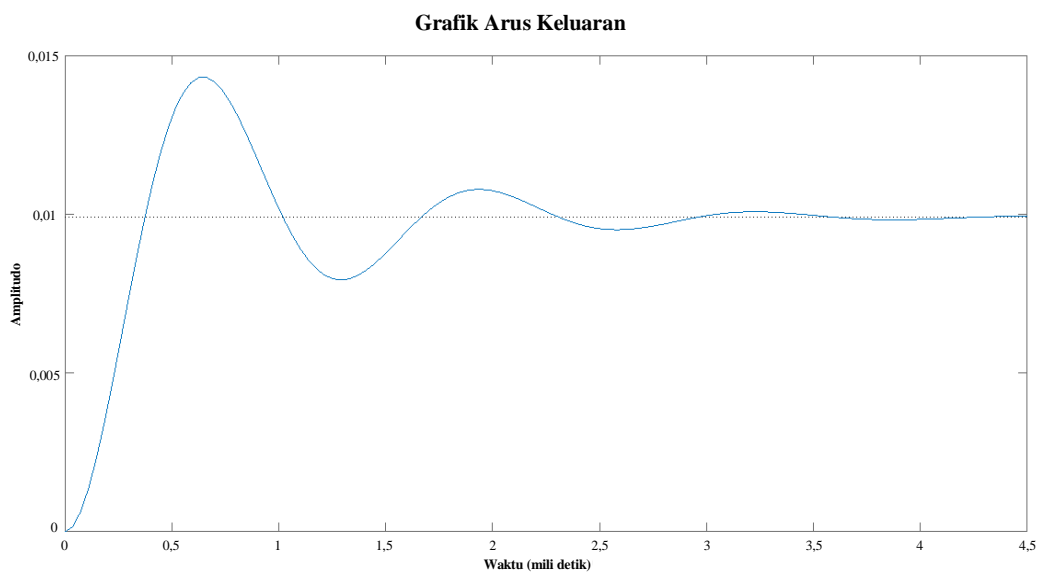
$$I_{act}(s) = \frac{3 \times 10^8}{s^2 + 2500s + 25 \times 10^6} \quad (5.6)$$

### 5.3. Analisis hasil simulasi

#### 5.3.1. Kontrol konvensional

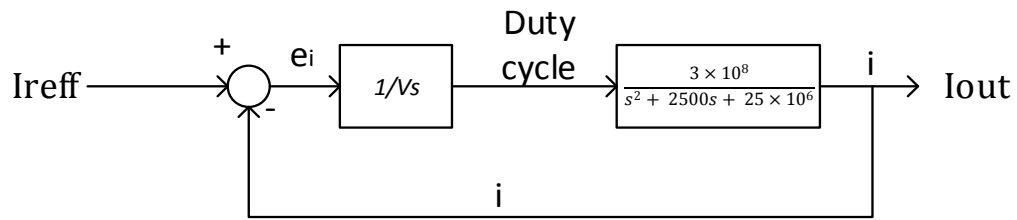
Kontrol konvensional adalah kontrol yang hanya mengandalkan penjumlahan dan pengurangan saja, dalam pengujian kontrol ini tidak memasukkan fungsi alih *plant* yang telah ditemukan. Melainkan menggunakan fungsi alih aktuator dalam keadaan maksimal, hal ini dikarenakan hal tersebut sudah dapat mewakili seluruh keadaan selama tidak lebih dari karakteristik maksimum yang telah ditentukan. Sehingga persamaan dalam kontrol konvensional ini dapat dilihat dalam Persamaan 5.7. Hasil respon dapat dilihat dalam Gambar 5.7.

$$G(s) = \frac{250000}{s^2 + 2500s + 2,525 \times 10^7} \quad (5.7)$$



Gambar 5. 7 Respon arus kontrol konvensional

Hasil respon keluaran ternyata tidak mencapai angka 1, respon keluaran hanya sanggup mencapai 0,01. Selain itu, waktu puncaknya 0,6ms dan *overshoot* sebesar 44% tidak dapat diterapkan dalam perangkat keras. Hal ini karena hasil simulasi terlalu cepat dari karakteristik perangkat keras yang telah ditentukan, yaitu butuh waktu 30ms untuk menampilkan dan mengambil datanya. Maka simulasi menggunakan domain Laplace dalam kasus ini tidak dapat dijadikan acuan untuk membuat perangkat keras. Adapun proses mendapatkan Persamaan 5.7 dapat dilihat dalam diagram blok di Gambar 5.8.



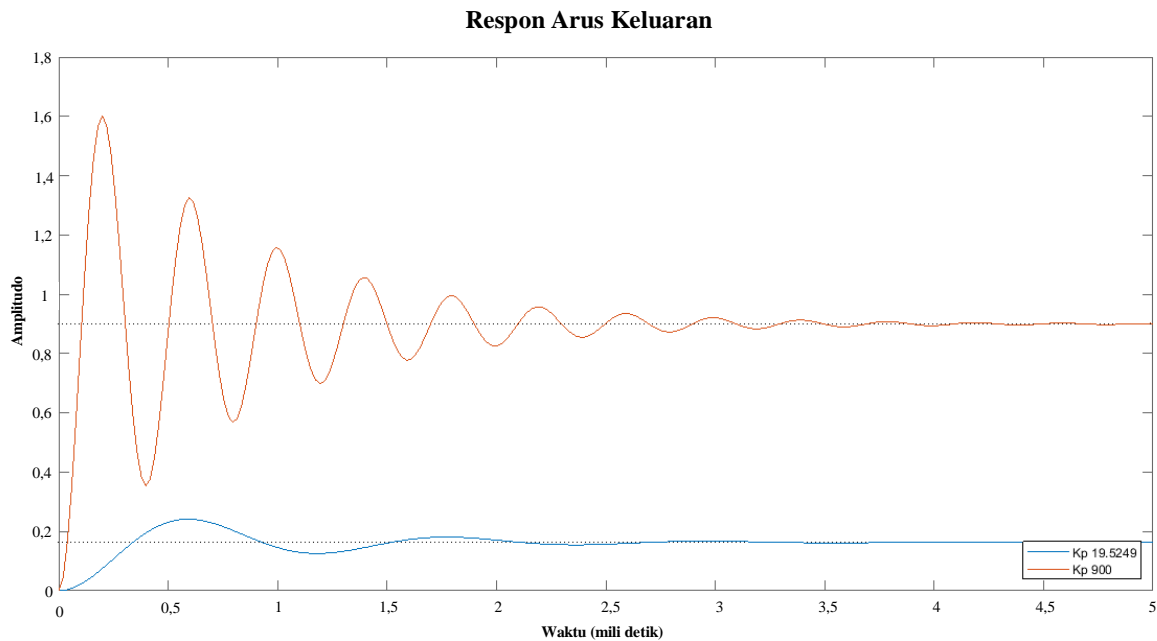
Gambar 5. 8 Diagram blok kontrol konvensional

### 5.3.2. Kontrol P

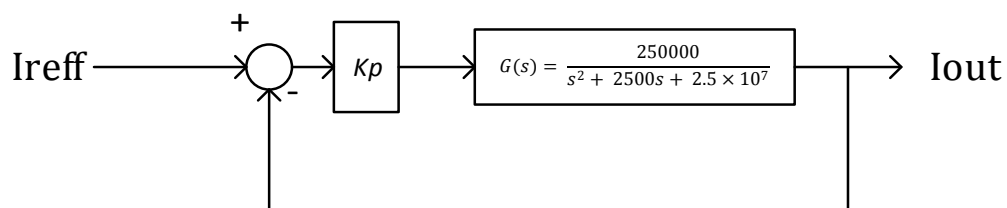
Hasil respon sistem menggunakan kontrol proporsional tidak dapat membuat sistem stabil, dimana dari seluruh nilai  $K_p$  yang dicari tidak dapat memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan. Nilai  $K_p$  terkecil yaitu 19,5249, menghasilkan respon dengan nilai puncak sebesar  $589\mu s$  dengan persentase *overshoot* 48,27. Sedangkan nilai  $K_p$  terbesar yaitu 900, menghasilkan respon dengan nilai waktu puncaknya sebesar  $190\mu s$  dan persentase *overshoot* sebesar 98,76. Fenomena ini dapat dilihat dalam Gambar 5.9 dan Persamaan 5.7 menggunakan nilai  $K_p$  19,5249.

Semakin besar nilai  $K_p$  maka waktu puncaknya akan semakin cepat, namun dampaknya adalah persentase *overshoot* yang semakin besar. Selain itu gelombang dengan nilai  $K_p$  yang besar membuat responnya berosilasi lebih banyak daripada respon yang nilai  $K_p$ nya lebih kecil. Dalam sistem ini juga, respon tidak mencapai nilai arus yang ditentukan, yaitu sebesar 3A. Proses mendapatkan Persamaan 5.8 mengacu pada diagram blok di Gambar 5.10. Hasil pencarian kedudukan akar-akar dapat dilihat dalam Tabel 5.1.

$$G(s) = \frac{4,881 \times 10^6}{s^2 + 2500s + 2,98 \times 10^7} \quad (5.8)$$



Gambar 5. 9 Perbandingan nilai Kp berbeda dalam simulasi dalam kontrol P



Gambar 5. 10 Diagram blok kontrol P

Tabel 5. 1 Hasil pencarian nilai Kp kontrol P

Nilai Kp	Rise Time (detik)	SettlingTime (detik)	Overshoot (%)	PeakTime (detik)
19,5249	0,000227	0,003074	47,80	0,000589
31,2106	0,000214	0,002965	49,45	0,000552
36,4927	0,000209	0,002917	50,24	0,000552
42,6688	0,000201	0,002831	51,24	0,000515
63,0770	0,000188	0,003096	53,19	0,000515
109,0274	0,000164	0,003132	57,60	0,000442
149,0542	0,000149	0,002930	60,40	0,000405
352,2227	0,000107	0,003031	68,92	0,000295
563,0279	$8,7345 \times 10^{-5}$	0,002993	73,59	0,000244
900	$7,0102 \times 10^{-5}$	0,003025	77,94	0,000198

### 5.3.3. Kontrol PI

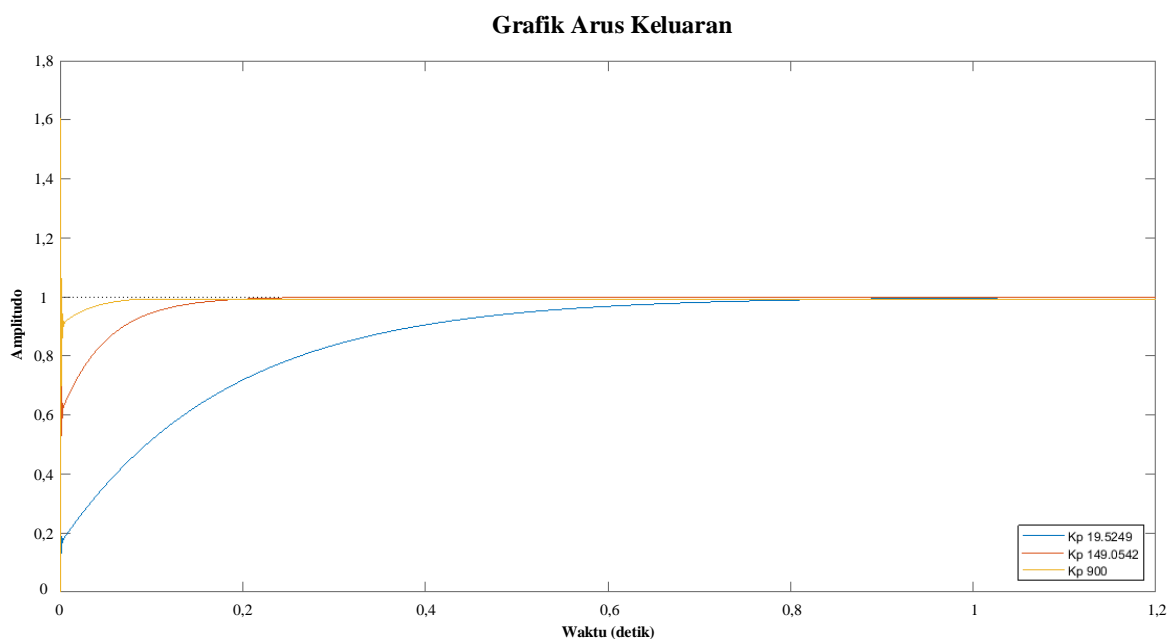
Hasil respon sistem menggunakan kontrol PI memiliki hasil yang lebih baik daripada sistem yang menggunakan kontrol konvensional dan kontrol P. Hal ini dapat dilihat dalam Tabel 5.2, di dalam tabel tersebut terdapat respon yang memiliki *overshoot* dan ada yang



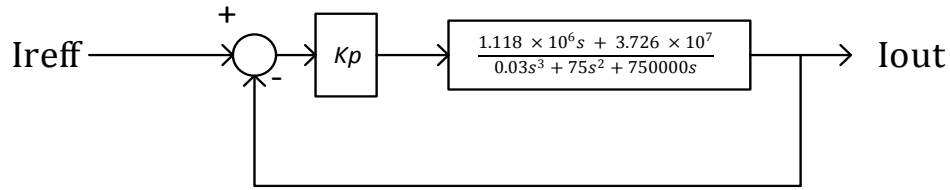
tidak memiliki *overshoot*. Nilai Kp rendah memberikan nilai waktu puncak yang rendah, fenomena ini terlihat ketika nilai Kp 19.5249. Nilai Kp tersebut memiliki waktu puncak 1,21 detik tanpa *overshoot*. Nilai Kp 900 memiliki waktu puncak 198,7 $\mu$ s dengan overshoot 60,4%. Nilai Kp 161,1745 merupakan perkiraan batas antara respon yang memiliki *overshoot* dan tidak, dinilai Kp ini respon memiliki waktu puncak 388,9 $\mu$ s.

Respon keluaran tergambarkan dalam Gambar 5.11, dalam gambar tersebut dapat dilihat 3 nilai Kp terendah. Dimasing-masing respon terdapat osilasi yang sangat singkat di awal naiknya gelombang, hal ini dapat diabaikan karena nilainya yang sangat kecil. Sehingga tidak mempengaruhi atau seakan akan tidak ada. Maka nilai Kp yang terbaik adalah 149,0542, dan memiliki nilai Ki 4968,5. Fenomena ini dideskripsikan dalam fungsi alih di Persamaan 5.9 dengan mengacu pengoperasiannya menggunakan diagram blok yang berada di Gambar 5.12.

$$G(s) = \frac{1,118 \times 10^6 s + 3,726 \times 10^7}{0,03s^3 + 75s^2 + 1,868 \times 10^6 s + 3,726 \times 10^7} \quad (5.9)$$



Gambar 5. 11 Perbandingan nilai Kp berbeda dalam simulasi Kontrol PI



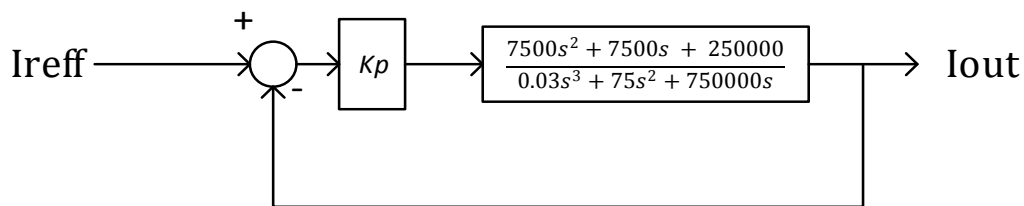
Gambar 5. 12 Diagram blok kontrol PI

Tabel 5. 2 Hasil pencarian nilai Kp dan Ki

Nilai Kp	Nilai Ki	Rise Time (detik)	SettlingTime (detik)	Overshoot (%)	PeakTime (detik)
19,5249	650,83	0,3897	0,6854	0	1,2102
24,6857	822,85	0,3151	0,5591	0	1,2056
31,2106	1040,35	0,2558	0,4589	0	1,1264
39,4601	1315,33	0,2086	0,3792	0	0,8238
149,0542	4968,47	0,000262	0,1502	0	0,2643
161,1745	5372,48	0,000234	0,1433	0	0,000388
203,7758	6792,52	0,000190	0,1251	10,07	0,000360
257,6374	8587,91	0,000161	0,1097	19,85	0,000332
608,8103	20293,67	$9,4452 \times 10^{-5}$	0,0681	50,11	0,000236
900	30000	$7,5707 \times 10^{-5}$	0,0535	60,45	0,000198

#### 5.3.4. Kontrol PID

Persamaan 5.10 adalah fungsi alih dengan respon terbaik dalam sistem menggunakan kontrol PID, persamaan ini didapat mengacu pada diagram blok dalam Gambar 5.13. Fungsi alih tersebut menggunakan nilai Kp 9,4858, Ki 316,1963 dan Kd 0,2845. Karakteristik yang dimiliki adalah tanpa *overshoot* dan memiliki nilai puncak 2,06 detik.



Gambar 5. 13 Diagram blok kontrol PID

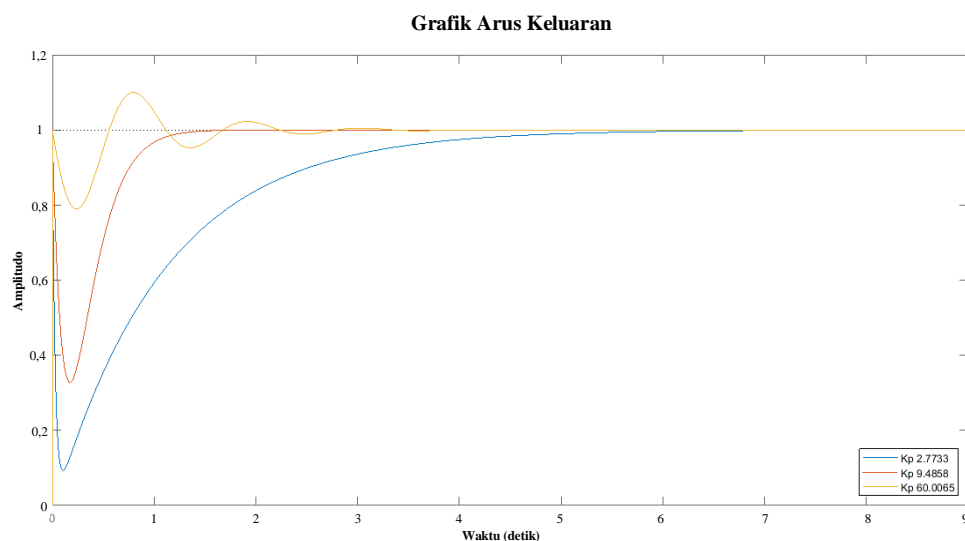
$$G(s) = \frac{7,114 \times 10^4 s^2 + 7,114 \times 10^4 s + 2,371 \times 10^6}{0,03 s^3 + 7,122 \times 10^4 s^2 + 8,211 \times 10^5 s + 2,371 \times 10^6} \quad (5.10)$$

Tabel 5. 3 Hasil pencarian nilai Kp Ki dan Kd

Nilai Kp	Nilai Ki	Nilai Kd	Rise Time (detik)	SettlingTime (detik)	Overshoot (%)	PeakTime (detik)
0,0305	1,0176	0,00091	215,9850	384,5188	0	746,548
0,0850	2,8356	0,0025	77,5503	138,0453	0	280,4689
0,1931	6,4372	0,0057	35,8066	60,854	0	130,5761
1,2216	40,7214	0,0366	0,0003	9,6706	0	16,5572
4,1785	139,2846	0,1253	0,0001	2,8156	0	4,8733
9,4858	316,1963	0,2845	0,0069	1,1014	0	2,068
14,2923	476,4130	0,4287	$3,6919 \times 10^{-5}$	1,1074	2,74	0,9477
32,4458	1081,5266	0,9733	$7,2266 \times 10^{-5}$	1,5591	10,31	0,8056
60,0065	2000,2185	1,8001	0,00011	2,0006	9,96	0,7973
90,4118	3013,7294	2,7123	0,00014	2,0282	8,26	0,7977

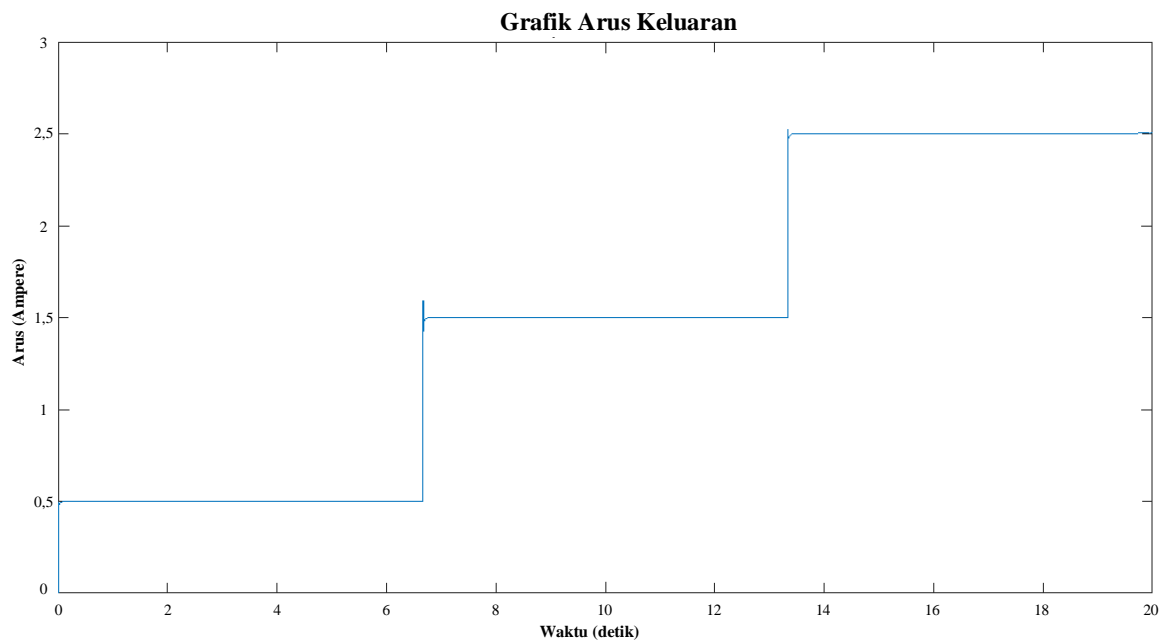
Menggunakan nilai Kp berbeda tentu akan mengubah nilai Ki dan Kd juga, namun fenomena yang terjadi adalah waktu puncak dalam sistem menggunakan PID ini tidak lebih cepat dibandingkan dengan waktu puncak dalam sistem menggunakan PI. Berbanding terbalik dalam karakteristik *overshoot*, persentase *overshoot* lebih kecil di sistem PID. Hal ini dapat dilihat dalam Tabel 5.3. Nilai waktu puncak tercepat terdapat dalam nilai Kp 90,41, yaitu 0,7978 detik. Bentuk respon keluaran dapat dilihat dalam Gambar 5.14, setiap respon melakukan osilasi. Namun nilai Kp 60,0066 memiliki osilasi lebih banyak dan *overshoot* yang lebih besar dibanding nilai Kp lainnya.

Kontrol PID dalam sistem ini tidak dapat digunakan untuk perangkat keras, karena waktu puncak di bawah 1 detik dan secara respon keseluruhan memiliki *overshoot*. Waktu puncak di atas 1 detik tidak memiliki *overshoot*. Waktu puncak ini terlalu lambat dan dapat mengganggu jalannya sistem dalam perangkat keras.



Gambar 5. 14 Perbandingan nilai Kp berbeda dalam simulasi Kontrol PID

### 5.3.5. Simulasi Scilab Xcos



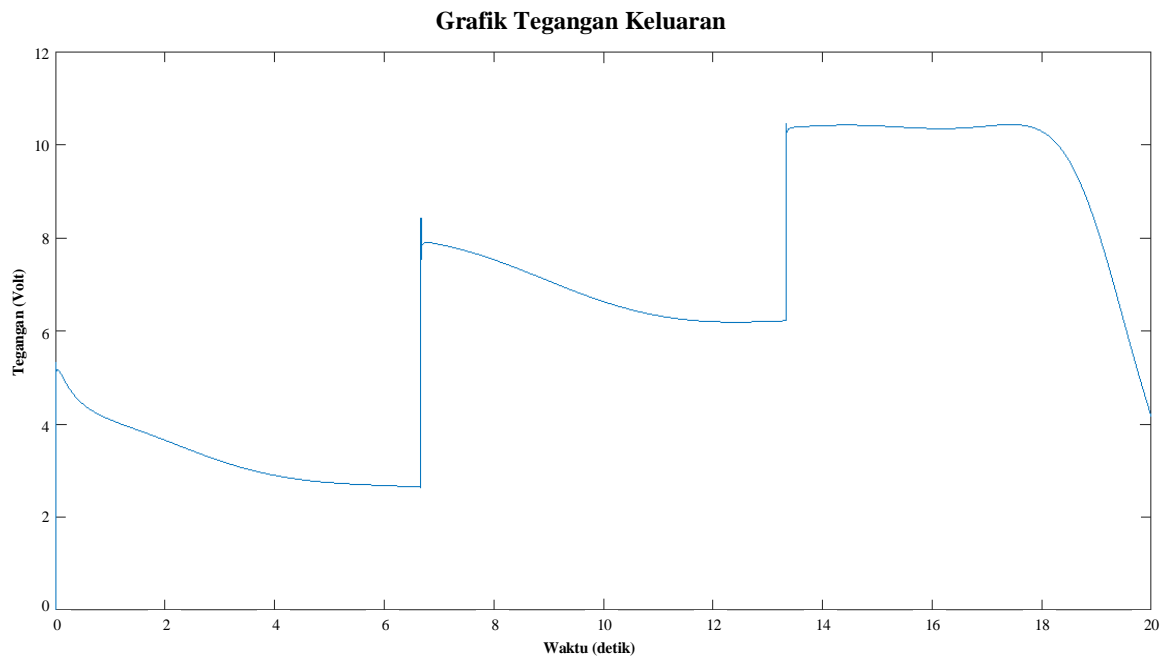
Gambar 5. 15 Hasil arus keluaran simulasi Xcos Scilab

Simulasi Xcos Scilab menggunakan kontroler terbaik yang telah dianalisis sebelumnya, yaitu kontrol PI dengan nilai  $K_p$  149,0542, dan  $K_i$  4968,5. Simulasi didasarkan pada diagram blok *state space* di Gambar 4.7, dalam simulasi ini digunakan *plant* yang mengacu pada Gambar 5.4. Plant disimbolkan dalam R dan resolusi waktu yang digunakan adalah 1ms. Hasilnya arus keluaran dapat dilihat dalam Gambar 5.15, terlihat bahwa arus keluaran sudah konstan sesuai dengan arus referensinya.

Respon dalam Gambar 5.15 memiliki *overshoot* saat terjadi perubahan arus referensinya, yaitu saat arus referensi 0,5A ke 1,5A dan 1,5A ke 2,5A. Besarnya *overshoot* saat perubahan arus referensi 0,5A ke 1,5A adalah 1.595A, atau dalam persentase sebesar 9,5%. Sedangkan saat perubahan arus referensi 1,5A ke 2,5A, *overshoot* sebesar 2,522A atau dalam persentase sebesar 2,2%. Hal ini terjadi karena yang digunakan hanya 1 *plant*, sedangkan seharusnya arus referensi tetap. Maka terjadilah *overshoot* tersebut. Namun jika kita mengacu hasil pemodelan dan karakteristik *plant*, yaitu mengacu dari Persamaan 5.2 maka hasil tersebut tidak mempengaruhi pelapisan *electroforming* ini. Selain itu *overshoot* ini juga tidak melebihi spesifikasi *hardware* yang telah ditentukan, yaitu 3A.

Tegangan keluaran dalam simulasi diperlihatkan dalam Gambar 5.16, respon berbeda dengan respon keluaran arus. Respon tegangan keluaran tidak konstan tiap perubahan arus referensinya, hal ini karena sistem berusaha membuat arus keluaran konstan dengan

mengecilkan tegangan. Setiap perubahan arus referensi, tegangan juga memiliki *overshoot* seperti respon arus keluaran. *Overshoot* ini tidak mempengaruhi pelapisan dan tidak melebihi tegangan maksimum, yaitu 12V. Sehingga seluruh hasil simulasi ini dinyatakan berhasil karena masih dalam batas toleransi yang diperbolehkan.



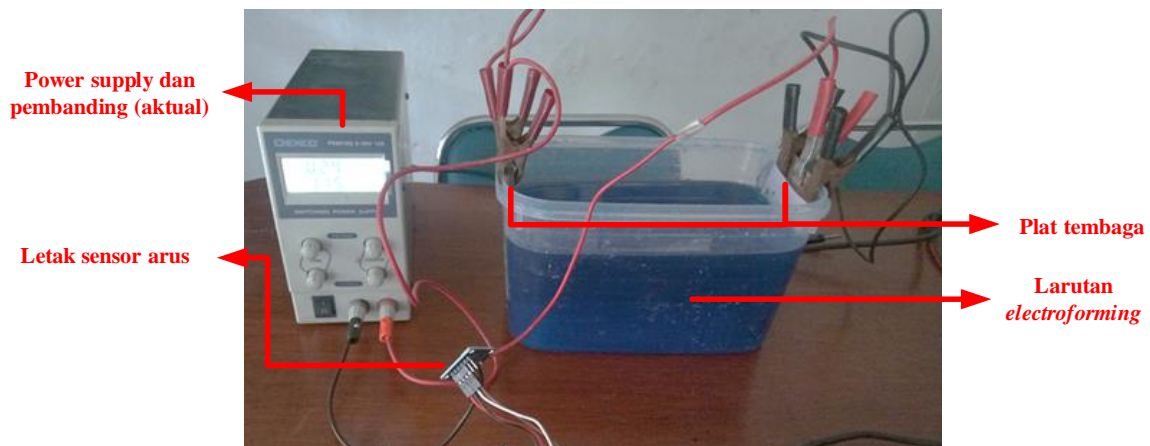
Gambar 5. 16 Hasil respon tegangan keluaran simulasi Xcos Scilab

## 5.4. Analisis hasil implementasi perangkat keras

### 5.4.1. Sensor Arus

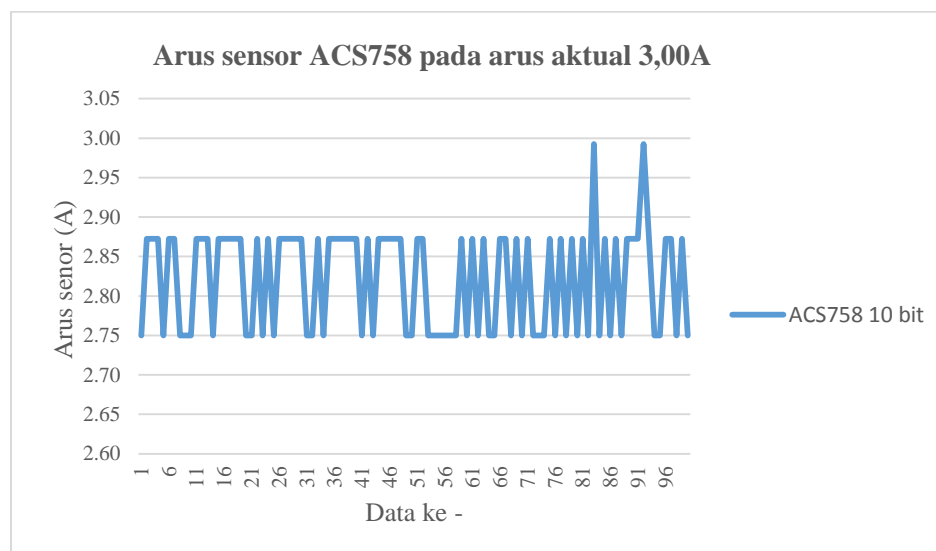
Sensor ACS758 menggunakan ADC 10 bit internal At-mega16 memiliki hasil yang berbeda disetiap nilai pengujian arus aktual. Data hasil pengujian ini dapat dilihat dalam Tabel 5.4. Kolom pengukuran adalah keluaran arus ACS758 yang dirata-ratakan dari 100 data, dan kolom aktual adalah nilai arus pembanding (Dekko PS-305Q), instalasi pengujian ini ditunjukkan dalam Gambar 5.17. Perhitungan galat atau *error* menggunakan Persamaan 5.11.

$$Galat = \frac{|pengukuran - aktual|}{aktual} \times 100\% \quad (5.11)$$



Gambar 5. 17 Instalasi pengujian sensor arus

Rata-rata galat yang terjadi dari seluruh pengujiannya adalah sebesar 42,16%,. Galat terbesar terjadi di pengujian di arus listrik aktual 0,05A, nilainya mencapai 240%. Pola galat yang terjadi adalah nilai galat berkurang seiring pertambahan pengujian arus listrik. Angka arus yang diberikan pun tidak stabil disetiap pengujian arus aktual, hal ini dapat dilihat dalam Gambar 5. 18 dan Tabel 5.4.



Gambar 5. 18 Grafik arus keluaran ACS758 menggunakan ADC 10 bit

Data pada Tabel 5.4 dapat digunakan untuk kalibrasi sensor, kalibrasi menggunakan regresi linier. Maka hasilnya dapat dilihat dalam Tabel 5.5. R adalah batas atas dan bawah bagi kemiringan (gradien) garis regresi dengan selang kepercayaan 99,5%, sedangkan  $S_x$  bernilai rata-rata kesalahan antara data  $y$  dan regresi sebesar 10%. Maka untuk persamaan

arus setelah kalibrasi adalah pada Persamaan 5.12. Grafik analisis dapat dilihat dalam Gambar 5.19.

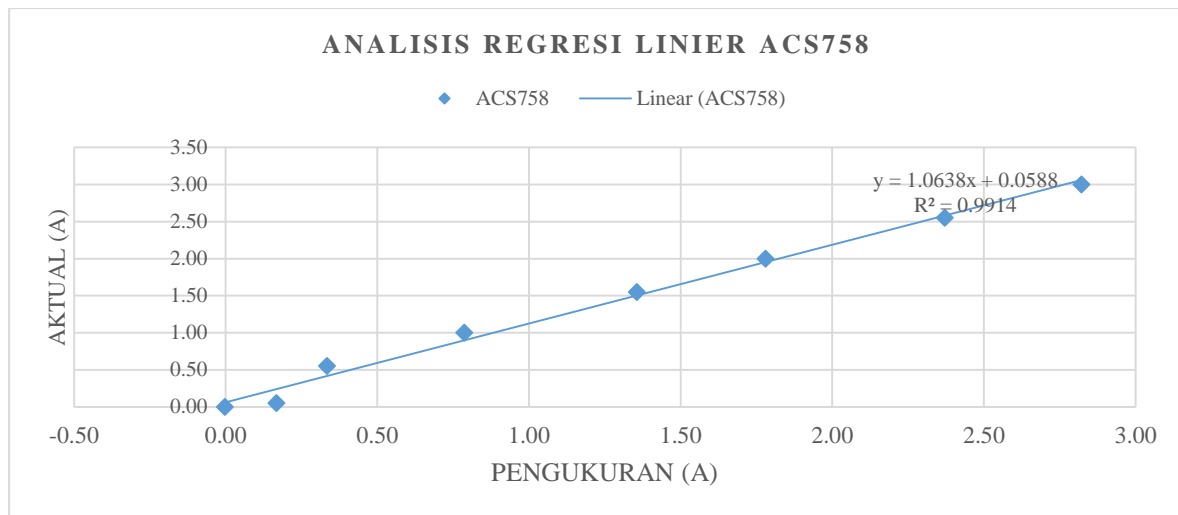
Tabel 5. 4 Hasil pengujian ACS758 menggunakan ADC 10 bit

No	Pengukuran (A)	Aktual (A)	Galat (%)
1	0,00	0,00	0,00
2	0,17	0,05	240
3	0,33	0,55	40
4	0,79	1,00	21
5	1,36	1,55	12,26
6	1,78	2,00	11
7	2,37	2,55	7,00
8	2,82	3,00	7,06
Rata-Rata Galat			42,16

$$I_{10bit} = \left( \frac{ADC \times V_{ref}}{1024 \times sens} \times b \right) + a \quad (5.12)$$

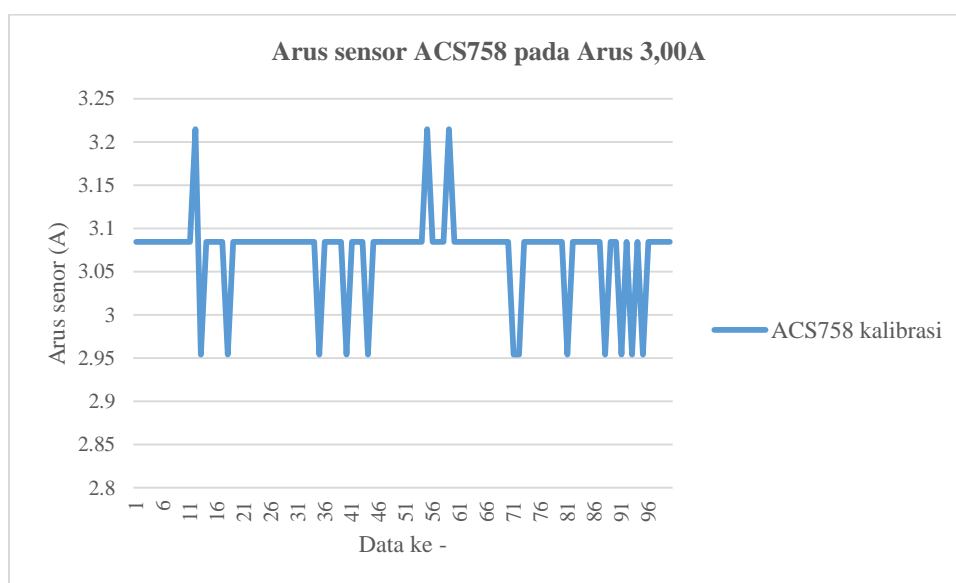
Tabel 5. 5 Analisis perhitungan kalibrasi ACS758 10 bit

No	Pengukuran sumbu x	Aktual sumbu y	xy	x^2	b	a	D^2	Dt^2	R (%)	Sx (%)
1	0,00	0,00	0,0000	0,0000	1,0638	0,0588	0,0032	1,7889	99,5667	10,4849
2	0,17	0,05	0,0084	0,0282			0,0351	1,6577		
3	0,33	0,55	0,1839	0,1118			0,0183	0,6202		
4	0,79	1,00	0,7864	0,6185			0,0109	0,1139		
5	1,36	1,55	2,1018	1,8387			0,0024	0,0452		
6	1,78	2,00	3,5597	3,1679			0,0023	0,4389		
7	2,37	2,55	6,0473	5,6239			0,0010	1,4702		
8	2,82	3,00	8,4667	7,9650			0,0037	2,7639		
Jumlah	9,6160374	10,7	21,1542	19,3539			0,0770	8,8988		
Rata-Rata	1,202004675	1,3375	2,6443	2,4192			0,0096	1,1123		



Gambar 5. 19 Grafik analisis regresi linier pada kalibrasi ACS758

Sensor diuji kembali menggunakan Persamaan 5.12, menggunakan cara yang sama dengan sebelumnya. Didapatkan hasil yang tidak konstan dalam membaca arus, fenomena ini dapat dilihat dalam Gambar 5.20. Data yang sudah dikumpulkan dirata-rata dan setiap nilai pengujiannya dihitung galatnya, maka didapat hasil galat rata-rata 40,26%. Hali ini dapat dilihat dalam Tabel 5.6. Penurunan galat hanyalah sebesar 1.32%, dan tidak besar perubahannya. Galat terbesar terjadi pada pengujian arus aktual 0,05A, yaitu sebesar 260%. Data-data galat dan rata-rata arus hasil pengujian dapat dilihat dalam Tabel 5.6. Kesimpulan dari pengujian ini adalah sensor ACS758 menggunakan 10 bit tidak bisa membaca arus dengan resolusi 0,01A, karena keluarannya sensor ACS758 tidak konstan dan galatnya terlalu besar.



Gambar 5. 20 Hasil pengujian ACS758 ADC 10 bit setelah kalibrasi



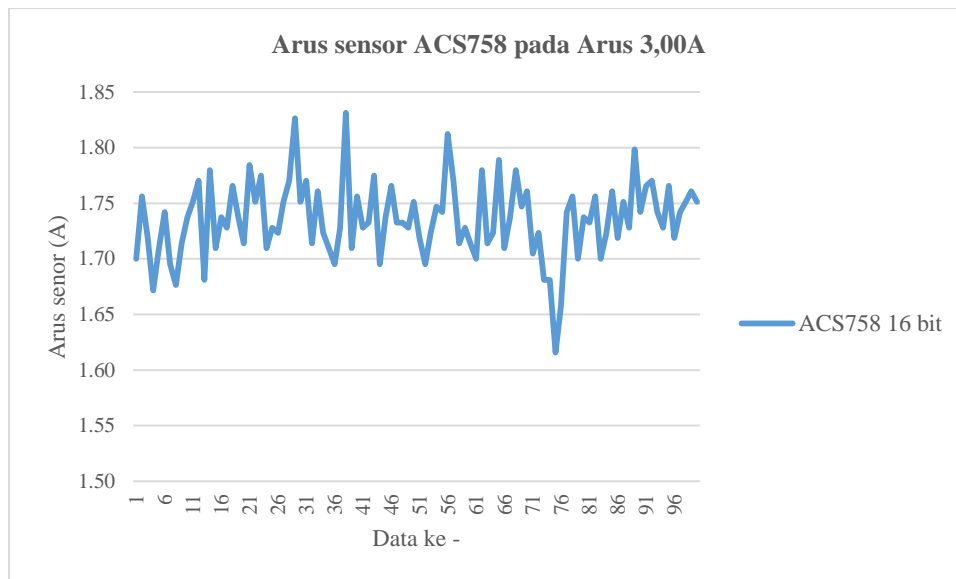
Tabel 5. 6 Hasil pengujian ACS758 ADC 10 bit setelah kalibrasi

No	Pengukuran (A)	Aktual (A)	Galat (%)
1	0,00	0,00	0,00
2	0,18	0,05	260
3	0,36	0,55	34,55
4	0,84	1,00	16
5	1,44	1,55	7,10
6	1,89	2,00	5,50
7	2,52	2,55	1,18
8	3,00	3,00	0,00
Rata-Rata Galat			40,54

Selanjutnya pengujian kedua ACS758 dibaca menggunakan ADC 16 bit modul ADS1115. Hasil yang didapat adalah nilai antara pengukuran dan aktual berbeda jauh, sehingga galat di setiap pengujian arus aktualnya diatas 50%. Pengujian sensor pada arus aktual 0,00A hingga 1,00A memiliki nilai negatif di data pengukuran, saat nilai aktual 3,00A nilai pengukuran yang keluar hanya 1,74A. Galat terbesar terjadi dipengujian arus aktual 0,05A dengan nilai 2640%, dan pola galatnya adalah semakin berkurang seiring dengan pertambahan nilai pengujian aktualnya. Hal ini dapat dilihat dalam Tabel 5.7, nilai pengukuran dalam tabel ini merupakan rata-rata dari 100 data pengukuran. Hasil pengukuran dalam pengujian ini juga memiliki *noise* seperti pengujian ACS758 menggunakan 10 bit sebelumnya, datanya dapat dilihat dalam Gambar 5.21.

Tabel 5. 7 Hasil pengujian ACS758 menggunakan ADC 16 bit

No	Pengukuran (A)	Aktual (A)	Galat (%)
1	-1,49	0,00	0,00
2	-1,27	0,05	2640
3	-0,76	0,55	238,18
4	-0,28	1,00	128
5	0,21	1,55	86,45
6	0,72	2,00	64
7	1,23	2,55	51,76
8	1,74	3,00	42,00
Rata-Rata Galat			406,30



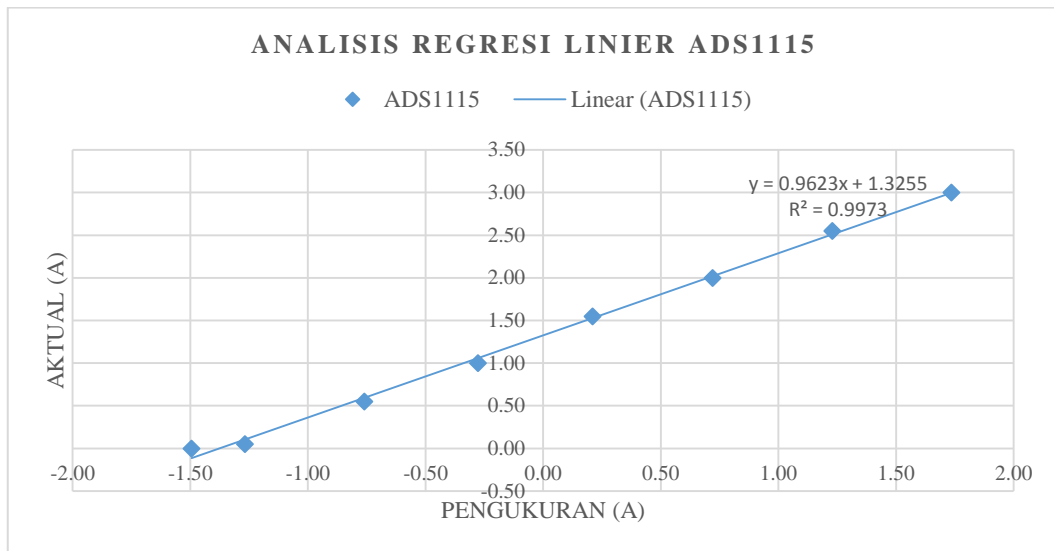
Gambar 5. 21 Grafik arus keluaran ACS758 menggunakan ADC16 bit

Regresi linier digunakan kembali untuk melakukan kalibrasi sensor ACS758 menggunakan ADS1115, data yang digunakan adalah data hasil percobaan menggunakan data pada Tabel 5.7. Nilai b yang didapat adalah 1,2547 dan nilai a didapat 1,3219, nilai ini digunakan untuk mendapatkan nilai arus yang sudah dikalibrasi. Persamaan arus kalibrasi menggunakan Persamaan 5.13. Persamaan tersebut dapat dipercaya, karena hasil analisis regresi liniernya adalah 95,8668%. Nilai Sx sebesar 5,8173%. Nilai R dan Sx dalam uji coba di sini lebih kecil daripada percobaan sebelumnya, yaitu ACS758 menggunakan ADC 10 bit. Grafik regresi linier untuk kalibrasi ACS758 menggunakan ADS1115 dapat dilihat dalam Gambar 5.22.

Tabel 5. 8 Analisis perhitungan kalibrasi ACS758 ADC 16 bit

No	Pengukuran sumbu x	Aktual sumbu y	xy	x^2	b	a	D^2	Dt^2	R	Sx
1	-1,49	0,00	0,0000	0,0000	0,9632	1,3255	0,0130	1,7889	99,8668	5,8173
2	-1,27	0,05	-0,0634	1,6069			0,0030	1,6577		
3	-0,76	0,55	-0,4179	0,5773			0,0019	0,6202		
4	-0,28	1,00	-0,2772	0,0768			0,0034	0,1139		
5	0,21	1,55	0,3273	0,0446			0,0004	0,0452		
6	0,72	2,00	1,4425	0,5202			0,0004	0,4389		
7	1,23	2,55	3,1373	1,5137			0,0016	1,4702		
8	1,74	3,00	5,2069	3,0124			0,0000	2,7639		
Jumlah	0,09935	10,7	9,3554	7,3518			0,0237	8,8988		
Rata-Rata	0,01241875	1,3375	1,1694	0,9190			0,0030	1,1123		

$$I_{16bit} = \left( \frac{ADC \times 0,1875}{1000 \times 0,04} \times b \right) + a \quad (5.13)$$

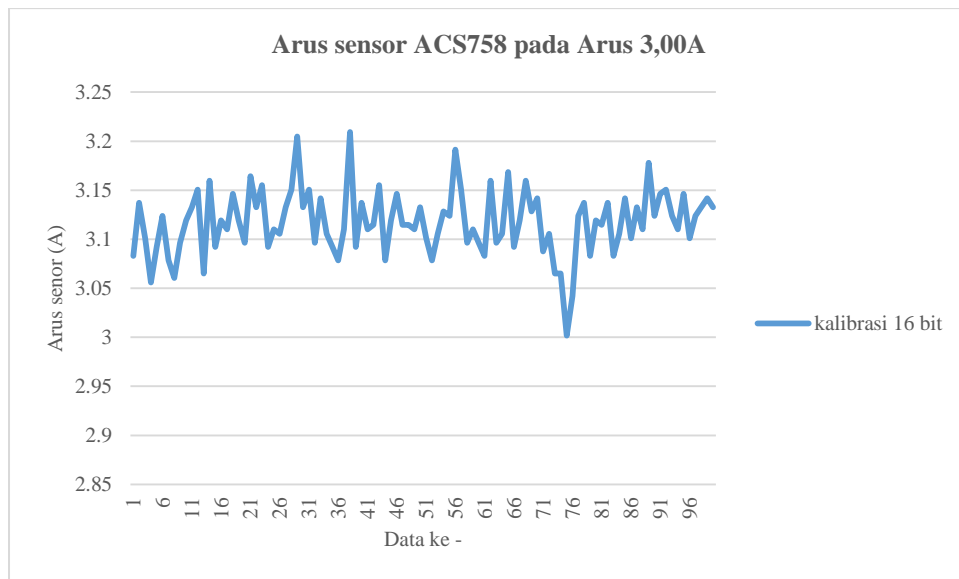


Gambar 5. 22 Grafik analisis regresi linier ACS758 ADC 16 bit

Persamaan 5.13 digunakan untuk menguji hasil kalibrasi, hasilnya adalah rata-rata galat dalam percobaan ini 14,68%. Perubahannya sangat besar dan mendekati nilai aktualnya. Namun nilai galat terbesar tetap terjadi dalam percobaan arus aktual 0,05A, nilai galat sebesar 100%. Data hasil percobaan ACS758 dengan ADS1115 dapat dilihat dalam Tabel 5.9. Respon keluaran arus hasil perhitungan terlihat lebih responsif daripada percobaan sebelumnya, hal ini dapat dilihat dalam Gambar 5.24. Artinya dengan ADC 16 bit arus yang kecil dapat terbaca, namun sensor ACS758 tidak dapat digunakan. Karena data asli tertutupi oleh *noise* sensor.

Tabel 5. 9 Hasil pengujian ACS758 ADC 16 bit setelah kalibrasi

No	Pengukuran (A)	Aktual (A)	Galat (%)
1	-0,12	0,00	0,00
2	0,10	0,05	100
3	0,59	0,55	7,27
4	1,06	1,00	6
5	1,53	1,55	1,29
6	2,02	2,00	1
7	2,51	2,55	1,57
8	2,99	3,00	0,33
Rata-Rata Galat			14.68

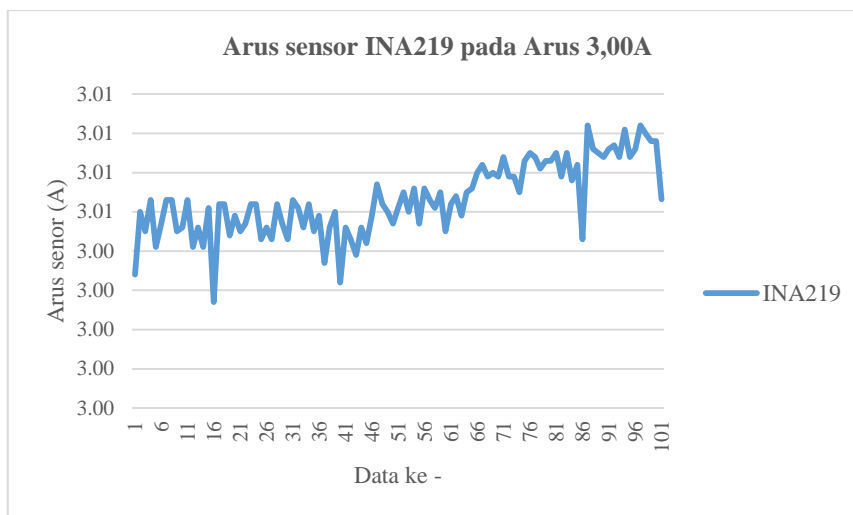


Gambar 5. 23 Hasil pengujian ACS758 ADC 16 bit setelah kalibrasi

Pengujian sensor INA219 memiliki galat lebih kecil daripada 2 pengujian sebelumnya. Nilai galat terbesar terdapat dalam pengujian arus aktual 0,05A, nilainya sebesar 40%. Namun diatas arus aktual 0,05A nilai galatnya sangat kecil. *Noise* dalam pengukuran dalam sensor ini tetap terjadi. Data hasil pengujian dapat dilihat dalam Tabel 5.10 dan respon arus hasil perhitungan atau yang di baca oleh sensor INA219 dapat dilihat dalam Gambar 5.24.

Tabel 5. 10 Hasil pengujian sensor INA219

No	Pengukuran (A)	Aktual (A)	Galat (%)
1	0,00	0,00	0,00
2	0,03	0,05	40
3	0,53	0,55	3,64
4	0,98	1,00	2,00
5	1,54	1,55	0,65
6	1,99	2,00	0,50
7	2,55	2,55	0
8	3,01	3,00	0,33
Rata-Rata Galat			5,89



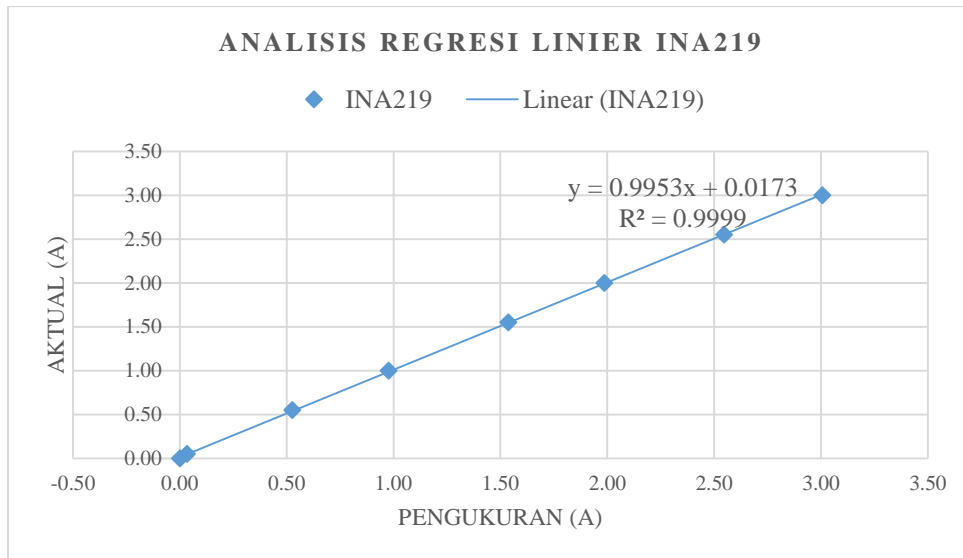
Gambar 5. 24 Respon arus sensor INA219

Analisis regresi linier menggunakan data pada Tabel 5.10 untuk melakukan kalibrasi. Hasil analisis didapatkan bahwa nilai  $b$  sebesar 0,9953 dan nilai  $a$  sebesar 0,0173, data regresi linier dapat dilihat dalam Tabel 5.11, grafik regresi linier percobaan ini dapat dilihat dalam Gambar 5.25. Maka persamaan untuk mendapatkan arus dalam percobaan ini ditunjukkan dalam Persamaan 5.14. Hasil analisis regresi linier dipengujian dapat dipercaya, karena memiliki nilai  $R$  sebesar 99,9968 % dan nilai  $S_x$  yang sangat kecil yaitu 0,9069%.

$$I_{INA} = \left( \frac{ADC}{10000} \times b \right) + a \quad (5.14)$$

Tabel 5. 11 Analisis perhitungan regresi linier pada INA219

No	Pengukuran sumbu x	Aktual sumbu y	xy	x^2	b	a	D^2	Dt^2	R (%)	Sx (%)
1	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,9953	0,0173	0,0003	1,7889	99,9968	0,9069
2	0,03	0,05	0,0017	0,0011			0,0000	1,6577		
3	0,53	0,55	0,2895	0,2771			0,0001	0,6202		
4	0,98	1,00	0,9770	0,9545			0,0001	0,1139		
5	1,54	1,55	2,3829	2,3634			0,0000	0,0452		
6	1,99	2,00	3,9730	3,9461			0,0000	0,4389		
7	2,55	2,55	6,4929	6,4833			0,0000	1,4702		
8	3,01	3,00	9,0160	9,0320			0,0001	2,7639		
Jumlah	10,611363	10,7	23,1328	23,0574			0,0006	8,8988		
Rata-Rata	1,326420375	1,3375	2,8916	2,8822			0,0001	1,1123		

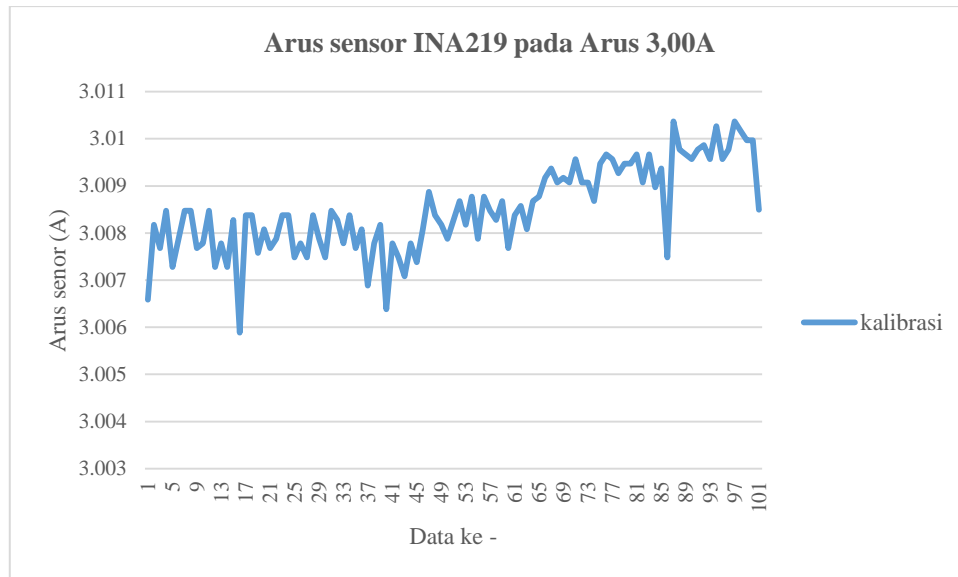


Gambar 5. 25 Grafik analisis regresi linier INA219

Pengujian INA219 menggunakan Persamaan 5.14 memiliki *noise* yang sangat kecil, di bawah 0,01A, dan galat rata-rata dalam pengujian ini sebesar 0,46%. Galat terbesar terjadi dalam pengujian nilai arus aktual 0,55, yaitu sebesar 1,82%. Maka diantara INA219 dapat digunakan dalam sistem *power supply* otomatis karena sanggup membaca nilai arus dengan resolusi 0,01A dan *noise* yang dihasilkan oleh sensor INA219 sangat kecil. Data dapat dilihat dalam 5.12 dan respon arus pembacaan dapat dilihat dalam Gambar 5.26.

Tabel 5. 12 Hasil pengujian INA219 setelah kalibrasi

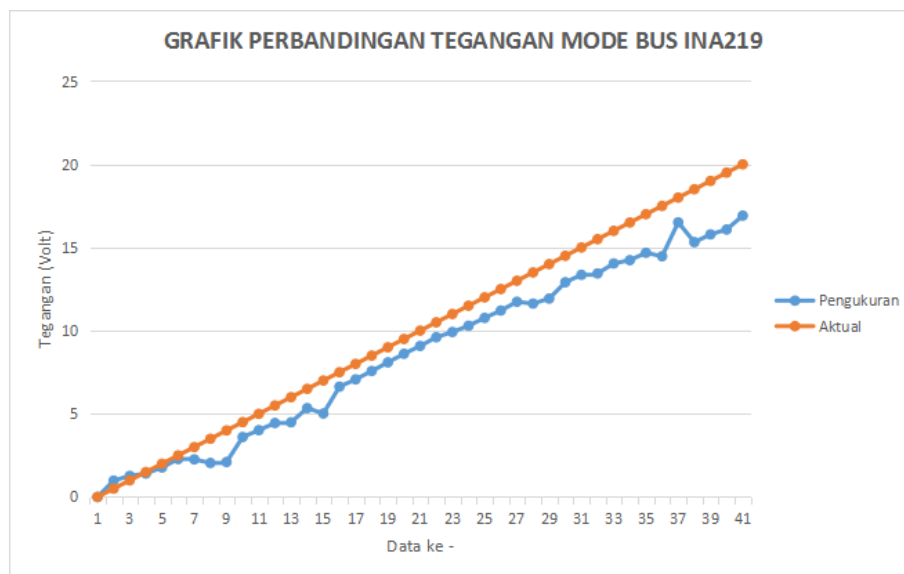
No	Pengukuran (A)	Aktual (A)	Galat (%)
1	0,00	0,00	0,00
2	0,05	0,05	0
3	0,54	0,55	1,82
4	0,99	1,00	1
5	1,55	1,55	0
6	1,99	2,00	0,50
7	2,55	2,55	0,00
8	3,01	3,00	0,33
Rata-Rata Galat			0,46



Gambar 5. 26 Respon arus sensor INA219 setelah kalibrasi

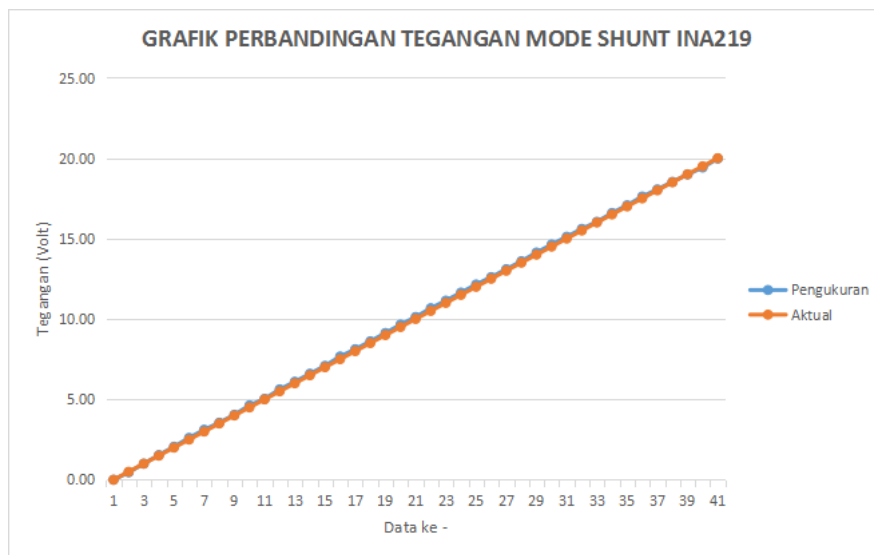
#### 5.4.2. Sensor Tegangan

Hasil uji coba mode pengukuran tegangan BUS dan SHUNT pada sensor INA219 didapatkan bahwa pengukuran tegangan menggunakan mode tegangan BUS INA219 memiliki rata-rata galat 17,37%. Gambar 5.27 memperlihatkan hasil uji coba tegangan menggunakan mode BUS INA219, nilai pengukuran memiliki karakteristik yang cenderung tidak stabil jika dibandingkan dengan nilai aktualnya. Nilai galat terbesar dalam mode BUS INA219 ini adalah sebesar 97,7%, dan fenomena ini terjadi di uji coba tegangan aktual 0,5V. Artinya mode ini tidak cocok untuk pengukuran tegangan di bawah 1V.



Gambar 5. 27 Hasil uji coba mode BUS INA219

Berbeda dengan hasil uji coba menggunakan mode SHUNT INA219, terlihat rata-rata galatnya memiliki 1,44%. Hasil pengukuran juga memiliki karakteristik yang lebih stabil apabila dilihat dalam Gambar 5.28. Galat tertinggi terjadi dalam uji coba pada tegangan aktual 0,5V, yaitu sebesar 7,04% dengan selisih pengukuran sebesar 0,04V. Mengingat dalam kontrol, kestabilan sensor dan tingkat galat sensor menjadi faktor penting. Maka pengukuran tegangan mode SHUNT INA219 menjadi pilihan terbaik untuk sistem ini.



Gambar 5. 28 Hasil uji coba mode SHUNT INA219

#### 5.4.3. Program mikrokontroler

Ujicoba mode konstan tegangan menggunakan sintaks program pada Tabel 5.13, maka didapatkan hasil nilai tegangan di dalam Tabel 5.14. Data dalam Tabel 5.14 diambil menggunakan pencatatan. Seluruh data dalam Tabel 5.14 menunjukkan tegangan aktual sudah konstan dan tegangan aktual dapat mendekati nilai tegangan referensi yang telah di berikan. Namun, masih terdapat galat. Hal ini terjadi akibat dari kemampuan sensor tegangan yang memiliki galat rata-rata 1.44%, galat tersebut sudah dibahas dalam subbab 5.3.2 sebelumnya. Namun rata-rata galat pada ujicoba ini lebih besar dari rata-rata galat sebelumnya, yaitu 2,09% dengan galat tertinggi 10%.

Tabel 5. 13 Sintaks program untuk kontrol mode konstan tegangan

```
interrupt [TIM0_OVF] void timer0_ovf_isr(void)
{
    if ((pilihan == 1) && (aktif == 1)){
        Va = ina219_teganganshunt(&ina219);
        duty aktual = Va/12.00;
```



```

        duty_error = (Vr/12.00)-duty_aktual;
        duty1 = duty0-duty_error;
        PWM = 1024 * duty1;
        OCR1A = (int)PWM;
        duty0 = duty1;
    }
    else if ((pilihan == 1) && (aktif == 0)){
        OCR1A = 0;
        duty0 = 0;
        duty1 = 0;
    }
}

```

Tabel 5. 14 Data hasil uji coba mode konstan tegangan

No	Pengukuran (V)	Referensi (V)	Galat (%)
1	0,18	0,10	10,00
2	2,09	2,10	0,48
3	4,07	4,10	0,73
4	6,10	6,10	1,64
5	8,10	8,10	0,99
6	10,10	10,10	0,79
7	12,00	12,00	0,00
Rata-Rata Galat			2,09

Ujicoba mode konstan arus menggunakan sintaks Tabel 5.15, metode yang digunakan untuk mengumpulkan data adalah dengan pencatatan. Data hasil ujicoba dapat dilihat dalam Tabel 5.16. Nilai arus dalam Tabel 5.16 sudah mendekati nilai arus referensi yang telah diberikan, namun hasil arus konstan masih memiliki galat. Galat terbesar terjadi di nilai arus referensi 0,02A, dengan nilai galat sebesar 50%. Rata-rata galat dalam ujicoba ini adalah sebesar 9,25%. Faktor kemungkinan terjadinya galat dalam uji coba ini adalah terdapat kesalahan perhitungan selisih waktu (**delta\_t**) dalam sintaks program, karena dalam pengambilan variabel waktu akhir tidak memperhitungkan kesalahan akibat keterlambatan sintaks program lain.

Tabel 5. 15 Sintaks program untuk kontrol arus konstan

```

interrupt [TIM0_OVF] void timer0_ovf_isr(void)
{
    TIMSK = (0<<TOIE0);
    if (cacah_waktu > 1){
        if ((pilihan == 2) && (aktif == 1)){
            t1 = 0.016 * cacah_waktu;
            I1 = ina219_arus_mA(&ina219);
            delta_I = I1-I0;
            delta_t = t1-t0;
            I = delta_t * (delta_I/2);
            kontrol = (Kp * delta_I) + (Ki * I);
            PWM = fabs(kontrol * 11);
            OCR1A = (int)PWM;
            t0 = t1;
            I0 = I;
        }
        else if ((pilihan == 2) && (aktif == 0)){
            cacah_waktu = 0;
            t0 = 0;
            t1 = 0;
            I = 0;
        }
    }
}

```

```

        I0 = 0;
        I1 = 1;
    }
    cacah_waktu = 0;
}
cacah_waktu++;
TCNT0 = 0;
TIMSK = (1<<TOIE0);
}

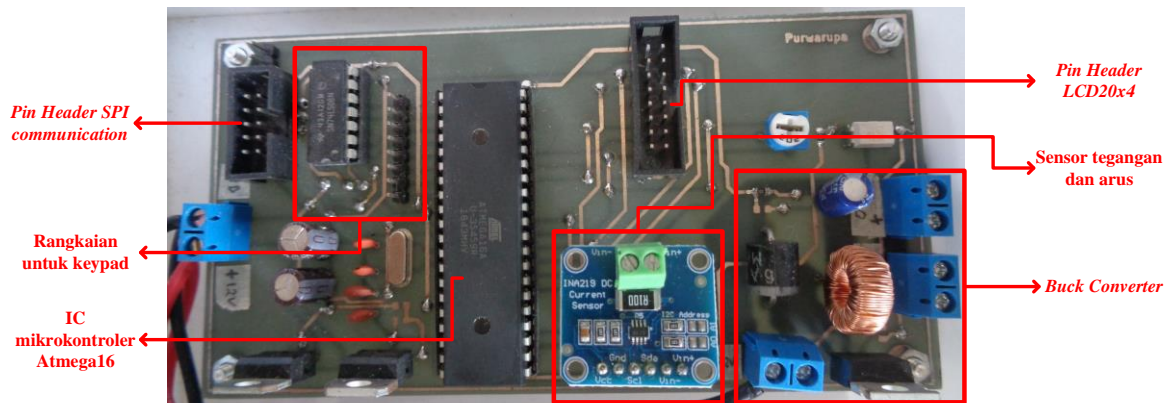
```

Tabel 5. 16 Data hasil uji coba mode konstan arus

No	Pengukuran (A)	Referensi (A)	Galat (%)
1	0,03	0,02	50,00
2	1,02	1,02	0,00
3	1,49	1,52	1,97
4	2,04	2,02	0,99
5	2,55	2,52	1,19
6	2,96	3,00	1,33
Rata-Rata Galat			9,25

#### 5.4.4. Analisis pengujian sistem pada pelapisan

Bentuk dari papan sirkuit dan bentuk catu daya secara keseluruhan ditampilkan di Gambar 5.29 dan Gambar 5.30. Untuk uji coba tunggal, Spesimen A menggunakan nilai arus sebesar 0,18A. Sedangkan Spesimen B menggunakan arus 0,10A. Uji coba parallel, terdapat 3 spesimen. Perhitungan tersebut dapat dilihat prosesnya pada Persamaan 5.11 hingga Persamaan 5.14. Maka Spesimen A untuk uji coba paralel menggunakan arus  $0,18A \times 3$  atau sebesar 0,54A. Spesimen B untuk uji coba paralel menggunakan arus  $0,10A \times 3 = 0.30A$ .

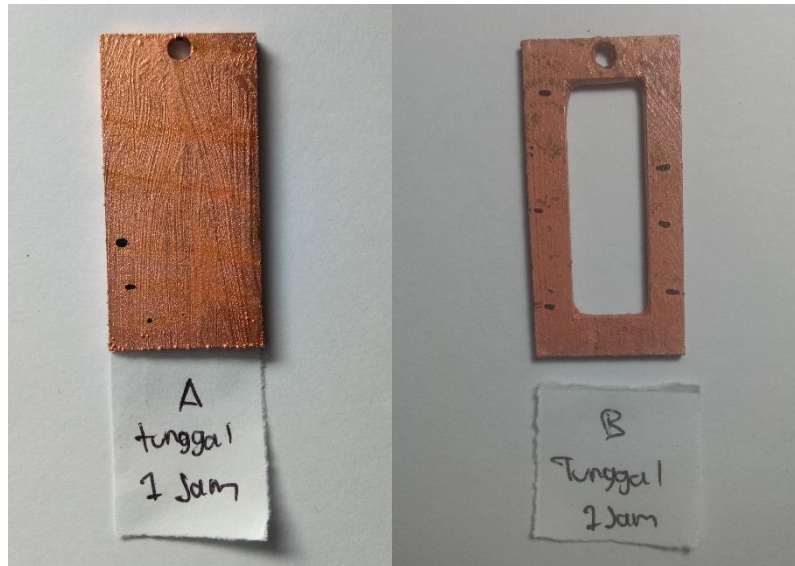


Gambar 5. 29 Rangkaian papan sirkuit sistem catu daya otomatis



Gambar 5. 30 Bentuk catu daya otomatis

Hasil ujicoba tunggal pada 2 spesimen memiliki warna yang tidak mengkilat, kedua spesimen dapat dilihat di Gambar 5.31. Warna ini bukan karena arus listrik yang berlebih, melainkan terjadi akibat oksidasi saat pengangkatan benda kerja dari cairan kimia. Ada faktor lain yang menyebabkan benda kerja cepat teroksidasi, yaitu karena cairan kimia kekurangan cairan pencerah. Karena cairan pencerah yang biasa digunakan dapat mengurangi laju oksidasi benda kerja. Pada ujicoba ini yang diuji hanya ketebalan, maka benda kerja yang warnanya berubah karena teroksidasi dapat diabaikan. Fokus pada tebal pelapisan, karena hal ini yang berhubungan langsung dengan sistem kontrol arus yang diberikan.



Gambar 5. 31 Hasil ujicoba perangkat pada 2 jenis spesimen

$$A_{\text{spesimen A}} = 2 \times ((2 \times 4) + (2 \times 0,2) + (4 \times 0,2)) = 18,4 \text{ cm}^2 \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} A_{\text{spesimen B}} &= A_{\text{spesimen A}} - (2 \times ((1 \times 3) + (1 \times 0,2) + (3 \times 0,2))) \\ &= 18,4 - 7,6 = 10,8 \text{ cm}^2 \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$I_{SA} = \frac{A_{\text{spesimen A}} \times 2 \times 0,5}{100} = \frac{18,4 \times 2 \times 0,5}{100} = 0,18A \quad (5.13)$$

$$I_{SB} = \frac{A_{\text{spesimen B}} \times 2 \times 0,5}{100} = \frac{10,8 \times 2 \times 0,5}{100} = 0,10A \quad (5.14)$$

Keterangan:

$A_{\text{spesimen A}}$  = Luas permukaan total Spesimen A ( $\text{cm}^2$ )

$A_{\text{spesimen B}}$  = Luas permukaan total Spesimen B ( $\text{cm}^2$ )

$I_{SA}$  = Arus referensi Spesimen A (Ampere)

$I_{SB}$  = Arus referensi Spesimen B (Ampere)

Hasil pelapisan tunggal secara keseluruhan dapat dilihat dalam Tabel 5.17, ujicoba menggunakan laju pelapisan  $6,665 \frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$ . Hasil seluruh spesimen memiliki galat dan tidak sesuai dengan perhitungan menggunakan laju pelapisan  $6,665 \frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$ . Persentase galat menggunakan Persamaan 5.11. Persentase galat tertinggi terdapat dalam Spesimen B.2, dengan nilai sebesar 12,01%, sedangkan persentase galat terendah terdapat pada Spesimen A.2 yang memiliki nilai sebesar 0,33%.

$$\%galat = \frac{|tebal - tebal\ teori|}{tebal\ teori} \times 100\% \quad (5.11)$$

Tabel 5. 17 Hasil pelapisan tunggal uji coba perangkat

Nama	Waktu (jam)	massa awal (g)	massa akhir (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Luas Permukaan (cm <sup>2</sup> )	Tebal (μm)	Tebal teori (μm)	Persentase galat (%)
A.1	1	1,845	1,964	0,0132	18,4	7,18	6,665	7,81
A.2	2	1,71	1,93	0,024	18,4	13,28	13,33	0,34
A.3	3	1,86	2,176	0,0351	18,4	19,08	19,995	4,56
B.1	1	1,124	1,184	0,0067	10,8	6,17	6,665	7,38
B.2	2	1,098	1,212	0,0126	10,8	11,72	13,33	12,01
B.3	3	1,008	1,206	0,022	10,8	20,37	19,995	1,87

Pada ujicoba tunggal menggunakan spesimen jenis A memiliki nilai persentase galat yang lebih kecil dari spesimen jenis B. Kedua spesimen ini memiliki bentuk yang berbeda, Spesimen B memiliki bentuk yang sedikit lebih rumit daripada Spesimen A, karena terdapat sisi bagian dalam yang harus dilapisi. Pada Spesimen B, 2 dari 3 sampel ternyata memiliki tebal di bawah dari tebal teori. Hanya 1 yang berlebih, yaitu pada sampel B.3. Spesimen jenis A kebalikan dari Spesimen B hanya 1 sampel yang tebalnya di bawah tebal teori, yaitu sampel A.2.

Ujicoba perangkat pelapisan paralel pada Spesimen A, seluruh sampel tidak ada yang mencapai tebal teori. Hal ini dapat dilihat dalam Tabel 5.18, persentase galat tertinggi sebesar 40,20% dan persentase galat terkecil sebesar 6,68%. Hasil pelapisan tidak ada yang berbentuk bola bola besar, dan terlihat merata. Adapun warna menghitam bukan karena terbakar akibat kelebihan arus listrik. Melainkan teroksidasi saat keluar dari cairan kimia, hal ini sama seperti pada ujicoba tunggal sebelumnya. Pada ujicoba kedua, pada spesimen jenis B, hanya 2 spesimen yang tebalnya melebihi batas teori. Yaitu pada Spesimen B.1.1 dan B.3.3. Persentase galat terbesar pada Spesimen B diuji coba parallel adalah sebesar 56,77% dan persentase galat terkecil sebesar 2,75%.

Dari semua percobaan di atas, perangkat keras sudah mampu memberikan arus sesuai standar dan mampu memberikan arus konstan. Namun dalam penentuan ketebalannya masih

belum sesuai dengan tebal teori atau acuan. Maka ada kemungkinan perbedaan ketebalan diakibat kualitas kandungan dari cairan kimia yang berbeda dengan standar yang diberikan.

Tabel 5. 18 Hasil pelapisan paralel spesimen uji coba perangkat

Nama	Waktu (jam)	massa awal (g)	massa akhir (g)	Volume ( $cm^3$ )	Luas Permukaan ( $cm^2$ )	Tebal ( $\mu m$ )	Tebal teori ( $\mu m$ )	Persentase galat (%)
A.1.1	1	1,954	2,02	0,0073	18,4	3,98	6,665	40,20
A.1.2		1,872	1,968	0,0107		5,79	6,665	13,02
A.1.3		1,764	1,84	0,0084		4,58	6,665	31,14
A.2.1	2	1,714	1,92	0,0229		12,43	13,33	6,68
A.2.2		1,844	2,05	0,0229		12,43	13,33	6,68
A.2.3		1,856	2,042	0,0207		11,23	13,33	15,74
A.3.1	3	1,786	2,032	0,0273		14,85	19,995	25,70
A.3.2		1,772	2,002	0,026		13,89	19,995	30,53
A.3.3		1,794	1,99	0,0218		11,84	19,995	40,81
B.1.1	1	1,256	1,346	0,01	10,8	9,25	6,665	38,92
B.1.2		1,12	1,148	0,0031		2,88	6,665	56,77
B.1.3		1,134	1,172	0,0042		3,91	6,665	41,34
B.2.1	2	1,112	1,21	0,0108		10,08	13,33	24,36
B.2.2		1,162	1,288	0,014		12,96	13,33	2,75
B.2.3		1,106	1,208	0,0113		10,49	13,33	21,27
B.3.1	3	1,088	1,262	0,0193		17,90	19,995	10,47
B.3.2		1,078	1,24	0,018		16,67	19,995	16,64
B.3.3		1,128	1,33	0,0224		20,78	19,995	3,93







## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1. Kesimpulan

Dari seluruh fenomena yang terjadi dalam penelitian ini, maka peneliti dapat menyimpulkan bahwa:

- 1) Karakteristik *electroforming* jenis tembaga asam memiliki respon arus naik saat awal pelapisan, dan memiliki arus konstan saat semua benda kerja terlapsi oleh tembaga.
- 2) Pemodelan matematika menggunakan metode regresi polinomial, orde yang digunakan agar sinyal matematis sama dengan sinyal aktual *electroforming* adalah orde 10. Jika orde di bawah 10, maka yang terjadi sinyal hasil pemodelan matematika akan berbentuk lurus dan tidak mewakili. Jika orde di atas 10, maka yang terjadi adalah sinyal hasil pemodelan matematika akan semakin detail pada saat sinyal arus *electroforming* naik dan tidak dapat menyamakan bentuk sinyal saat sinyal arus *electroforming* konstan.
- 3) Pemodelan matematika yang terbaik untuk menggambarkan fenomena *buck converter* adalah *state space*, dari pemodelan tersebut dapat dilihat repon tegangan keluaran dan arus keluaran secara bersamaan dengan *input duty cycle* PWM.
- 4) Dari hasil simulasi dan uji coba Scilab, didapatkan hasil bahwa kontrol PI adalah kontrol terbaik untuk catu daya otomatis ini. Hal ini dikarenakan kontrol konvensional, dan kontrol P tidak memenuhi syarat untuk mengontrol arus. Kedua kontrol tersebut tidak mencapai target arus yang diberikan. Sedangkan kontrol PID dapat mengontrol arus konstan, namun dalam kontrol PID masih terjadi osilasi saat sinyal menuju *steady state*. Selain itu juga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *steady state* terlalu lama. Sehingga kontrol PI dengan konstanta  $K_p$  149,0542, dan nilai  $K_i$  4968,5 adalah kontrol yang terbaik untuk dimasukkan ke dalam sistem catu daya otomatis.
- 5) Menggunakan kontrol PI dan seluruh hasil pemodelan matematika yang telah dilakukan, maka sistem dapat disimulasikan menggunakan blok-blok yang akan dimasukkan ke dalam Xcos Scilab. Hasil simulasi sistem pada Xcos Scilab sudah dapat menyamakan arus keluaran dengan nilai arus referensi walaupun nilai arus referensinya berubah-ubah.
- 6) Kontrol PI terdiri dari kontrol P dan Kontrol I. Kontrol P dimasukkan ke dalam program mikrokontroler dengan cara mengalikan  $K_p$  dengan selisih arus pengukuran dan arus referensi. Sedangkan Kontrol I menggunakan metode numerik Trapezoidal. Kontroler

ini dimasukkan dalam fungsi *Interrupt Timer 0 Overflow*. Catu daya sudah bekerja otomatis untuk mengontrol arus untuk selalu konstan. Hal ini terbukti dengan nilai arus keluaran yang terus mendekati arus referensi yang telah diberikan. Namun, catu daya masih memiliki galat dalam pengontrolannya. Persentase rata-rata galat pada kontrol konstan tegangan sebesar 2,09% dan rata-rata galat pada kontrol konstan arus sebesar 9,25%. Dampak dari galat tersebut adalah hasil pelapisan yang memiliki galat pula, baik pelapisan yang dilakukan secara satuan (tunggal) ataupun pelapisan paralel (masal).

## 6.2. Saran

Terdapat parameter yang tidak dapat dibuktikan secara ilmiah dalam penelitian ini, yaitu kualitas kandungan larutan kimia antara penelitian dan standar, serta ukuran meratanya pelapisan pada seluruh permukaan benda kerja yang terlapisi. Maka disarankan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

- 1) Apabila menggunakan catu daya ini dan jika tujuan akhirnya adalah ketebalan yang presisi secara otomatis, maka tidak disarankan untuk melakukan pelapisan secara paralel.
- 2) Disarankan menggunakan alat pengukur ketebalan logam yang memiliki kepresisian tinggi untuk mengetahui ketebalan yang merata setiap permukaannya.
- 3) Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk berfokus pada elektro kimia untuk mendapatkan cairan yang memiliki kualitas yang baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abraham I Presmen, Keith Billings, Taylor Morey. (2001). Switching Power Supply Design. USA: McGraw-Hill
- Cristri, A.W.a, Iskandar, R.F. (2017). Analysis and Design of Dynamic Buck Converter with Change in Value of Load Impedance. *Science Direct Engineering Physics International Conference (EPIC)*: 398.
- Daniel W. hart. (2011). Power Electronics. USA: McGraw-Hill
- Eva Ostertagová (2012). Modelling Using Polynomial Regression. *Procedia Engineering* 48
- Katsuhiko Ogata. (2010). Modern Control Engineering 5<sup>th</sup> Edition. USA: Prentice Hall
- Leslie Curtis. (2004). Electroforming Jewellery Handbooks. London: A&C Black Publisher Ltd.
- Mahajan Sagar Bhaskar Ranjana, S. M. Badave, Pandav Kiran Maroti, S. M. Mule, Rishi M. Kulkarni (2016). DC-DC Current Buck Converter Through Duality Approach and its DC Transformer Modelling for Current Based Loads. *International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies [ICCPCT]*.
- Marty Brown. (2001). Power Supply Cookbook Second Edition. USA: Butterworth–Heinemann.
- Rizqy Andika Putra. (2019). Diskusi Hull Cell. Wawancara Pribadi di Workshop Detail Kediri.
- Saleh, Azhar A. (2014). Electroplating: Teknik Pelapisan Logam Dengan Cara Listrik. Bandung: Yrama Widya.
- Santanu Kapat, and Philip T. Krein. (2012). Formulation of PID Control for DC–DC Converters Based on Capacitor Current: A Geometric Context. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*. 27 (3): 1424-1434.

Sridhar Seshagiri, Ethan Block, Inigo Larrea and Luana Soares. (2016). Optimal PID Design for Voltage Mode Control of DC-DC Buck Converters. *IEEE Indian Control Conference (ICC)*: 99-104.

Yasser Mahmoodi, Davood Fathi. (2016). Interaction of TM / TE waves with graphite and MWCNT Photonic Crystals. *IEEE Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. 24 (1): 1805.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 Program Regresi Polinomial

```
clear;
clc;

[fd,SST,Sheetnames,Sheetpos] = xls_open('ujicobadataelectroforming2.xls');
[Value,TextInd] = xls_read(fd,Sheetpos(1));
mclose(fd);

[line, column] = size(Value);
n = line;//banyak data
orde = 10;

for indeks = 1:n
    Value(indeks,1)=Value(indeks,1) * 60;//ubah menit ke detik
end

for baris = 1:n
    pangkat = 1;
    for kolom = 1:(2 + ((orde*2)-1) + orde)
        if kolom <= 2 then
            data(baris,kolom) = Value(baris,kolom);//data(baris,1)=xi;data(baris,2)=yi
        elseif (kolom > 2) && (kolom <= 2 + ((orde*2)-1)) then
            data(baris,kolom) = data(baris,1)^(kolom-1);//xi^2...xi^(r+r)
        else
            data(baris,kolom) = (Value(baris,1)^pangkat) * data(baris,2);//(xi^1)yi...(xi^r)yi
            pangkat = pangkat + 1;
        end
    end
end

data(n+1,:) = sum(data,1);//susunan kolom jumlah sesuai susunan kolom array pada looping di atas
[line, column] = size(data);

xi_pangkat(1,1) = data(n+1,1);//xi^1
for indeks = 3:(2 + ((orde*2)-1))
    xi_pangkat(1,indeks-1) = data(n+1,indeks);//xi^2...xi^(r+r)
end
i=0;
for baris = 1:(orde+1)
    for kolom = 1:(orde+1)
        if (baris == 1) && (kolom == 1) then
            K1(baris,kolom) = n;
        elseif (baris==1) && (kolom > 1) then
            K1(baris,kolom) = xi_pangkat(1,kolom-1);
        elseif (baris > 1) then
            K1(baris,kolom) = xi_pangkat(1,kolom+i);
            if kolom == (orde+1) then
                i = i+1;
            end
        end
    end
end
end

i = 2;
K2(1,1) = data(n+1,2);
for indeks = (2 + (orde*2)):column
    K2(i,1) = data(n+1,indeks);
    i = i + 1;
end
```

```

Ka = inv(K1) * K2;

for baris = 1:n
    y(baris,1) = 0;
    xi(baris,1) = data(baris,1);
    yi(baris,1) = data(baris,2);
    for i = 0:orde
        y(baris,1) = y(baris,1) + (Ka(i+1,1) * (Value(baris,1)^i));
    end
    Ri(baris,1) = 2.2 / y(baris,1);
end

plot(xi,yi,'ro',xi,y);
xlabel("Waktu [Detik]");
ylabel("Arus Listrik [Ampere]");
title("Respon Arus Electroforming");
xgrid(1, 1, 10);
legend('Data','Regresi polinomial',2);

```

## Lampiran 2 Matrik Invers untuk Pemodelan Plant

37.0	255660.0	3.034 × 10 <sup>09</sup>	4.213 × 10 <sup>13</sup>	6.238 × 10 <sup>17</sup>	9.560 × 10 <sup>21</sup>	1.499 × 10 <sup>26</sup>	2.390 × 10 <sup>30</sup>	3.862 × 10 <sup>34</sup>	6.308 × 10 <sup>38</sup>	1.040 × 10 <sup>43</sup>
255660.0	3.034 × 10 <sup>09</sup>	4.213 × 10 <sup>13</sup>	6.238 × 10 <sup>17</sup>	9.560 × 10 <sup>21</sup>	1.499 × 10 <sup>26</sup>	2.390 × 10 <sup>30</sup>	3.862 × 10 <sup>34</sup>	6.308 × 10 <sup>38</sup>	1.040 × 10 <sup>43</sup>	1.727 × 10 <sup>47</sup>
3.034 × 10 <sup>09</sup>	4.213 × 10 <sup>13</sup>	6.238 × 10 <sup>17</sup>	9.560 × 10 <sup>21</sup>	1.499 × 10 <sup>26</sup>	2.390 × 10 <sup>30</sup>	3.862 × 10 <sup>34</sup>	6.308 × 10 <sup>38</sup>	1.040 × 10 <sup>43</sup>	1.727 × 10 <sup>47</sup>	2.887 × 10 <sup>51</sup>
4.213 × 10 <sup>13</sup>	6.238 × 10 <sup>17</sup>	9.560 × 10 <sup>21</sup>	1.499 × 10 <sup>26</sup>	2.390 × 10 <sup>30</sup>	3.862 × 10 <sup>34</sup>	6.308 × 10 <sup>38</sup>	1.040 × 10 <sup>43</sup>	1.727 × 10 <sup>47</sup>	2.887 × 10 <sup>51</sup>	4.854 × 10 <sup>55</sup>
6.238 × 10 <sup>17</sup>	9.560 × 10 <sup>21</sup>	1.499 × 10 <sup>26</sup>	2.390 × 10 <sup>30</sup>	3.862 × 10 <sup>34</sup>	6.308 × 10 <sup>38</sup>	1.040 × 10 <sup>43</sup>	1.727 × 10 <sup>47</sup>	2.887 × 10 <sup>51</sup>	4.854 × 10 <sup>55</sup>	8.200 × 10 <sup>59</sup>
9.560 × 10 <sup>21</sup>	1.499 × 10 <sup>26</sup>	2.390 × 10 <sup>30</sup>	3.862 × 10 <sup>34</sup>	6.308 × 10 <sup>38</sup>	1.040 × 10 <sup>43</sup>	1.727 × 10 <sup>47</sup>	2.887 × 10 <sup>51</sup>	4.854 × 10 <sup>55</sup>	8.200 × 10 <sup>59</sup>	1.391 × 10 <sup>64</sup>
1.499 × 10 <sup>26</sup>	2.390 × 10 <sup>30</sup>	3.862 × 10 <sup>34</sup>	6.308 × 10 <sup>38</sup>	1.040 × 10 <sup>43</sup>	1.727 × 10 <sup>47</sup>	2.887 × 10 <sup>51</sup>	4.854 × 10 <sup>55</sup>	8.200 × 10 <sup>59</sup>	1.391 × 10 <sup>64</sup>	2.369 × 10 <sup>68</sup>
2.390 × 10 <sup>30</sup>	3.862 × 10 <sup>34</sup>	6.308 × 10 <sup>38</sup>	1.040 × 10 <sup>43</sup>	1.727 × 10 <sup>47</sup>	2.887 × 10 <sup>51</sup>	4.854 × 10 <sup>55</sup>	8.200 × 10 <sup>59</sup>	1.391 × 10 <sup>64</sup>	2.369 × 10 <sup>68</sup>	4.049 × 10 <sup>72</sup>
3.862 × 10 <sup>34</sup>	6.308 × 10 <sup>38</sup>	1.040 × 10 <sup>43</sup>	1.727 × 10 <sup>47</sup>	2.887 × 10 <sup>51</sup>	4.854 × 10 <sup>55</sup>	8.200 × 10 <sup>59</sup>	1.391 × 10 <sup>64</sup>	2.369 × 10 <sup>68</sup>	4.049 × 10 <sup>72</sup>	6.939 × 10 <sup>76</sup>
6.308 × 10 <sup>38</sup>	1.040 × 10 <sup>43</sup>	1.727 × 10 <sup>47</sup>	2.887 × 10 <sup>51</sup>	4.854 × 10 <sup>55</sup>	8.200 × 10 <sup>59</sup>	1.391 × 10 <sup>64</sup>	2.369 × 10 <sup>68</sup>	4.049 × 10 <sup>72</sup>	6.939 × 10 <sup>76</sup>	1.192 × 10 <sup>81</sup>
1.040 × 10 <sup>43</sup>	1.727 × 10 <sup>47</sup>	2.887 × 10 <sup>51</sup>	4.854 × 10 <sup>55</sup>	8.200 × 10 <sup>59</sup>	1.391 × 10 <sup>64</sup>	2.369 × 10 <sup>68</sup>	4.049 × 10 <sup>72</sup>	6.939 × 10 <sup>76</sup>	1.192 × 10 <sup>81</sup>	2.054 × 10 <sup>85</sup>

### Lampiran 3 Program Pengujian Respon Step Aktuator

```

clear all;
clc;

s = tf('s');
figure(1)
hold on
for indeks = 1:10:50
    Vs = 12;
    L = indeks*10*power(10,-6)
    Cap = 100*power(10,-6);
    rc =10;
    R =20;

    %A(baris,kolom)
    A(1,1) = -(R*rc)/(L*(R+rc));    A(1,2) = -R/(L*(R+rc));
    A(2,1) = R/(Cap*(R+rc));        A(2,2) = -1/(Cap*(R+rc));

    B(1,1) = Vs/L;
    B(2,1) = 0;

    C(1,1) = (R*rc)/(R+rc);          C(1,2) = R/(R+rc);

    D=0;

    G(1,indeks) = (C*(inv((s*eye(2,2))-A))*B)+D;
    step(G(1,indeks));
    stepinfo(G(1,indeks))
end
legend({'G1','G2','G3','G4','G5'},'Location','southeast','Orientation','vertical')
hold off

```



## Lampiran 4 Foto Hasil Pelapisan Uji Coba Perangkat

